

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт кибернетики
 Направление подготовки «Стандартизация и метрология»
 Кафедра КИСМ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование метрологической надежности измерителей скорости «Визир»

УДК 681.2:531.7:006

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Ломакина Анастасия Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. КИСМ	Казakov Вениамин Юрьевич	Канд. физ.- мат. наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	Конотопский Владимир Юрьевич	Канд. эконом. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Пустовойтова Марина Игоревна	Канд. хим. наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. КИСМ	Стукач Олег Владимирович	Доктор технич. наук		

Томск – 2016 г.

ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для решения инновационных задач метрологического обеспечения, контроля качества, технического регулирования и проверки соответствия с использованием современных технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения.
P2	выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, проводить анализ состояния и динамики метрологического и нормативного обеспечения производства, производить оценку качества измерений, контроля и испытаний, проводить работы по автоматизации измерений и контроля в производстве и научных исследованиях.
P3	выполнять работы в области стандартизации и сертификации: выполнять разработку и экспертизу новых технических регламентов и другой нормативной документации, разрабатывать процедуры оценки соответствия, поддерживать единое информационное пространство планирования и управления предприятием на всех этапах жизненного цикла изделий.
P4	выполнять работы в области контроля и управления качеством: исследовать причины появления некачественной продукции, разрабатывать предложения по предупреждению и устранению причин брака, осуществлять приемочный и выходной контроль продукции, а также контроль производства на основе современных технических средств.
P5	использовать базовые знания в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения инновационной инженерной деятельности; организовывать работы по защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на них, проводить технико-экономический анализ по проектам связанным с метрологическим обеспечением производства.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P6	понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности, заниматься научно-педагогической деятельностью в области метрологии, технического регулирования и управления качеством
P7	эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок работ, демонстрировать ответственность за результаты работы
P8	владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности
P9	ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P10	следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности, проявлять гражданскую позицию, направленную на его совершенствование.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки (специальность) стандартизация и метрология
Кафедра КИСМ

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Ломакиной Анастасии Александровне

Тема работы:

Исследование метрологической надежности измерителей скорости «Визир»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№3626/с от 19.05.2016 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объект исследования – измеритель скорости радиолокационный «Визир» Режим работы – стационарный, патрульный Технические характеристики измерителя скорости «Визир» Нормируемые технические характеристики измерителей скорости Методы и средства поверки измерителей скорости «Визир» Математические модели изменения во времени погрешности СИ
--	---

	Критерии назначения межповерочных и межкалибровочных интервалов
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Обзор методов измерения скорости Анализ полноты статистических данных по метрологической надежности измерителей скорости «Визир» Исследование значений межповерочного интервала измерителей скорости «Визир» Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Социальная ответственность
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский Владимир Юрьевич
Социальная ответственность	Пустовойтова Марина Игоревна
Измеритель скорости радиолокационный «Визир»	Шепетовский Денис Владимирович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Измеритель скорости радиолокационный «Визир»	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	03.10.2014
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. – КИСМ	Казаков Вениамин Юрьевич	Канд.физико-матем. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Ломакина Анастасия Александровна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Ломакиной Анастасии Александровне

Институт	ИК	Кафедра	КИСМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	...
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	...
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	...
3. Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР	...
4. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	
5. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	...

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. «Портрет» потребителя
2. Оценка конкурентоспособности ИР
3. Матрица SWOT
4. Модель Кано
5. ФСА диаграмма
6. Оценка перспективности нового продукта
7. График разработки и внедрения ИР
8. Инвестиционный план. Бюджет ИП
9. Основные показатели эффективности ИП
10. Риски ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	Конотопский Владимир Юрьевич	Канд. эконом. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Ломакина Анастасия Александровна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ41	Ломакиной Анастасии Александровне

Институт	ИК	Кафедра	КИСМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Стандартизация и метрология

<p>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность» и вопросы, подлежащие разработке:</p>	<p>1. Выбор объекта раздела. Характеристика рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, оборудования)</p> <p>2. Техногенная безопасность <u>Вредные факторы:</u> (источники вредных факторов на рабочем месте, нормирование их действия на работника, ссылка; технические решения и системы обеспечения требований нормативных документов) <u>Опасные факторы:</u> (источники опасных факторов, нормативные требования по обеспечению безопасности работников, ссылка; организационные и технические решения и системы обеспечения требований безопасности)</p> <p>3. Региональная безопасность анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</p> <p>4. Пожарная безопасность (причины возгорания, категория помещения по ПБ, план эвакуации, средства первичного тушения)</p> <p>5. Влияние проекта на экологическую обстановку</p>
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Пустовойтова Марина Игоревна	Канд. хим. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Ломакина Анастасия Александровна		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки (специальность) Стандартизация и метрология
Уровень образования Магистратура
Кафедра КИСМ
Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
21.10.2014 г.	Измеритель скорости радиолокационный «Визир»	20
10.02.2015 г.	Метрологическая надежность средств измерений	20
15.09.2015 г.	Исследование метрологической надежности измерителей скорости «Визир»	15
20.01.2016 г.	Исследование изменений межповерочного интервала измерителей скорости «Визир»	15
04.04.2016 г.	Оформление необходимых приложений для пояснительной записки ВКР	10
12.04.2016 г.	Выполнение разделов «Финансовый менеджмент» и «Социальная ответственность»	10
23.02.2016 г.	Выполнение презентации для выступления с ВКР	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры КИСМ	Казаков Вениамин Юрьевич	Канд. физико-матем. наук		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры КИСМ	Стукач Олег Владимирович	Доктор технич. наук		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 106 с., 10 рис., 29 табл., 16 источников, 1 прил.

Ключевые слова: метрологическая надежность, измеритель скорости, межповерочный интервал.

Объектом исследования является измеритель скорости радиолокационный видеозаписывающий «Визир»

Цель работы – исследование значений межповерочного интервала измерителей скорости «Визир» на основе данных статистических наблюдений за 4 года.

В процессе работы на основании статистических наблюдений проводились исследования метрологической надежности измерителей скорости «Визир» с целью изменения межповерочного интервала.

В результате исследования метрологической надежности измерителей скорости оценены показатели надежности, в ходе анализа сбора данных на предприятии. Анализ показал, что форма сбора данных в корректировке не нуждается. Также на основании статистических данных скорректирован межповерочный интервал с 2 лет (по паспорту) до 9 месяцев, на основании расчетных данных.

Область применения: контроль скоростного режима движения автотранспорта сотрудниками Государственной инспекции безопасности дорожного движения.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

радиолокационный измеритель скорости: Измеритель, показания которого пропорциональны скорости удаляющегося или приближающегося транспортного средства.

транспортное средство: Устройство, предназначенное для перевозки по дорогам людей, грузов или оборудования, установленного на нем в соответствии с правилами дорожного движения.

эффект Доплера: Изменение (смещение) частоты радиосигнала, отраженного от движущегося объекта.

надежность: Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

межповерочный (межкалибровочный) интервал: Интервал времени, указанный в документе по поверке, в течение которого СИ должно удовлетворять установленным требованиям.

Обозначения и сокращения:

ТС – транспортное средство;

СИ – средства измерений;

МХ – метрологические характеристики;

ИС – измеритель скорости;

СВЧ – сверхвысокие частоты;

РЭ – руководство эксплуатации;

ПК – персональный компьютер;

МПИ – межповерочный интервал;

УРЧ – усилитель радиочастоты.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 8.565 – 99 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок установления и корректировки межповерочных интервалов эталонов
2. ГОСТ 12.1.004 – 91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования
3. ГОСТ 26.003 – 80 Система интерфейса для измерительных устройств с байт-последовательным, бит-параллельным обменом информацией. Требования к совместимости
4. ГОСТ 27.002 – 89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения
5. ГОСТ 27.410 – 87 Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность
6. ГОСТ Р 50856 – 96 Измерители скорости движения транспортных средств радиолокационные. Общие технические требования. Методы испытаний
7. РМГ 29 – 2013 ГСИ Метрология. Основные термины и определения
8. РМГ 74 – 2004 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений

Оглавление

Введение	13
1 Измеритель скорости радиолокационный «Визир»	16
1.1 Методы измерения скорости	16
1.1.1 Частотный метод	16
1.1.2 Фазовый метод	18
1.1.3 Импульсный метод	21
1.2 Эффект Доплера	24
1.3 Технические характеристики измерителя скорости «Визир»	26
1.4 Нормируемые технические характеристики измерителей скорости	28
1.5 Методы и средства поверки измерителей скорости «Визир»	30
2 Метрологическая надежность средств измерений	36
2.1 Основные понятия теории метрологической надежности	36
2.2 Математические модели изменения во времени погрешности	39
средств измерений	
2.2.1 Линейная модель изменения погрешности	39
2.2.2 Экспоненциальная модель изменения погрешности	42
2.2.3 Логистическая модель изменения погрешности	45
2.3 Межповерочные и межкалибровочные интервалы	49
2.3.1 Критерии назначения межповерочных и межкалибровочных	50
интервалов	
2.3.1.1 Вероятность метрологической исправности	50
2.3.1.2 Коэффициент метрологической исправности	51
2.3.1.3 Вероятность работы без метрологических отказов	52
(вероятность безотказной работы)	
3 Метрологическая надежность измерителей скорости «Визир»	53
3.1 Анализ полноты статистических данных по метрологической	53
надежности измерителей скорости «Визир»	

3.2 Исследование значений межповерочного интервала измерителей скорости «Визир»	56
3.2.1 Корректировка межповерочного (межкалибровочного) интервала первой партии приборов	58
3.2.2 Корректировка межповерочного (межкалибровочного) интервала второй партии приборов	64
3.2.3 Корректировка межповерочного (межкалибровочного) интервала всей партии приборов	68
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	73
5 Социальная ответственность	91
Заключение	103
Список публикаций	104
Список использованных источников	105
Приложение А (обязательное) Раздел на английском языке	107

Введение

В настоящее время в России количество дорожных происшествий произошедших по вине водителей недопустимо велико. Большую часть нарушений ПДД, повлекших тяжелые последствия, составляет превышение скорости движения [1]. Контроль скоростного режима производится с помощью радиолокационных измерителей скорости. Значительную долю парка измерителей скорости составляют радиолокационные видеозаписывающие измерители скорости «Визир» [2]. Так как штрафные санкции за превышение скорости налагаются на основе данных приборов, необходимо быть уверенным в их метрологической исправности. Метрологически исправным считается средство измерения, при котором все нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям.

Для контроля метрологической исправности средств измерений (СИ) проводятся периодические поверки и калибровки, при которых осуществляется контроль соответствия метрологических характеристик (МХ) установленным требованиям. Межповерочный (межкалибровочный) интервал (МПИ) является важнейшим параметром, определяющим уровень метрологической надежности СИ. С одной стороны, чем больше МПИ, тем ниже этот уровень, с другой стороны, чем меньше МПИ, тем больше финансовые затраты на проведение поверок (калибровок), а также издержки логистики, которые связаны с изъятием СИ с мест их непосредственной эксплуатации. Следовательно, нужно определить оптимальное значение МПИ.

Целью работы является исследование значений межповерочного интервала измерителей скорости «Визир» на основе данных статистических наблюдений за 4 года. На предприятии имеется парк приборов измерителей скорости, за которыми ведется наблюдение и собираются статистические данные. Для определения действительных значений межповерочного интервала был использован метод корректировки межповерочных интервалов (МПИ) группы средств измерений для случая, когда регистрируют только

альтернативный признак годности средств измерений. Показано, что межповерочный интервал необходимо значительно уменьшить по сравнению с паспортными данными изготовителя.

В первом разделе выполнен обзор методов измерения скорости, таких как частотный, фазовый, импульсный. Представлены технические характеристики измерителя скорости «Визир», принцип действия, основанный на эффекте Доплера, нормируемые технические характеристики измерителей скорости, описание стенда Сапсан 2, который используется при поверке радиолокационных измерителей скорости и представлены методы и средства поверки.

Во втором разделе приведены основные понятия по метрологической надежности, математические модели изменения во времени погрешности СИ, таких как линейная, экспоненциальная и логистическая, критерии назначения межповерочных и межкалибровочных интервалов.

Третий раздел посвящен исследованию метрологической надежности измерителей скорости «Визир». Произведен анализ полноты статистических данных по метрологической надежности. Анализ формы сбора данных на предприятии произведен на основе экспериментального метода, который позволил оценить все показатели надежности парка приборов. Анализ показал, что форма сбора данных в корректировке не нуждается. Получены рекомендации по изменению межповерочного (межкалибровочного) интервала на основе метода корректировки МПИ группы СИ, для случая, когда регистрируют только альтернативный признак годности. Показано, что уменьшение межповерочного интервала приведет к увеличению финансовых затрат на проведение проверок, а также к увеличению издержек логистики, связанных с изъятием СИ с мест их непосредственной эксплуатации. С другой стороны, более частые поверки позволят уменьшить количество приборов, у которых погрешность выходит за пределы, установленные в описании типа. Автовладельцы будут уверены в точности фиксации скорости, что позволит уменьшить количество споров и конфликтов. Корректировка межповерочного

интервала повысит качество управления дорожного движения, снижение аварийности и травматизма на дорогах.

В четвертом разделе приведен финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Описан расчет накопления проекта по затратам и произведена оценка экономической эффективности проекта.

В пятом разделе приведена социальная ответственность, содержащая пользу экологии и охраны труда, региональную безопасность по утилизации прибора по его приходу в негодность.

Основные результаты исследований представлены в тезисах докладов конференции «Современная техника и технологии» и «Информационно-измерительная техника и технологии».

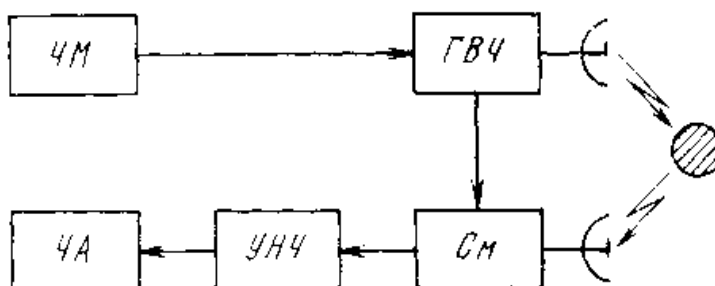
1 Измеритель скорости радиолокационный «Визир»

В настоящее время существует много методов измерения скорости, которые основаны на измерении времени запаздывания. Наибольшее распространение получили частотный, фазовый и импульсный методы. Достоинства этих методов в измерении малых дистанций, простоты устройства, использования маломощного излучения. Недостатки в высоких требованиях к линейности изменения частоты, использование двух антенн и ухудшение чувствительности приемника вследствие просачивания в приемный тракт через антенну излучения передатчика, подверженного случайным изменениям. Рассмотрим более подробно методы измерения дальности.

1.1 Методы измерения скорости

1.1.1 Частотный метод

В частотном методе измерения скорости за период измеряется частота, изменяющаяся по линейному закону. Сам метод реализован с помощью использования частотной модуляции излучаемых непрерывных сигналов [3].



ЧМ – частотный модулятор; ГВЧ – генератор высокой частоты; См – смеситель; УНЧ – усилитель низкой частоты; ЧА – частотный анализатор

Рисунок 1.1 – Структурная схема частотного метода

В данном методе излучается непрерывное частотно - модулированное колебание. Время запаздывания определяется путем измерения частоты биений между излучаемым и принимаемым сигналами.

Передатчик, представленный на рисунке 1.1, который состоит из частотного модулятора ЧМ и генератора высокой частоты ГВЧ, генерирует колебания, затем частота меняется по периодическому закону - пилообразному или гармоническому, представленным на рисунке 1.2 [3].

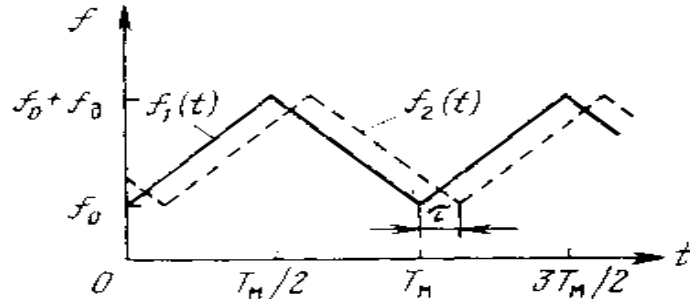


Рисунок 1.2 – Изменение частоты излучаемого и принимаемого сигналов частотного дальномера

При симметричном пилообразном законе модуляции частота излучаемых колебаний на диапазоне $0 \leq t \leq T_m/2$ определяется по формуле (1.1):

$$f_1(t) = f_0 + \frac{2f_d t}{T_m}, \quad (1.1)$$

где f_0 – начальное значение частоты, Гц;

f_d – девиация частоты, Гц;

$T_m = 1/F_m$ – период модуляции, с.

Частота принимаемого сигнала $f_2(t)$, Гц изменяется по пилообразному закону, когда объект неподвижен, определяется по формуле (1.2):

$$f_2(t) = f_0 + \frac{2f_d(t-\tau)}{T_m}, \quad (1.2)$$

При задержки сигнала на время τ , которое определяется по формуле (1.3):

$$\tau = 2R/c, \quad (1.3)$$

На выходе смесителя СМ образуются биения разностной частоты по формуле (1.4):

$$f_6 = f_1(t) - f_2(t) = \frac{4f_d F_m R}{c}, \quad (1.4)$$

где F_m – частота модуляции, Гц.

Биения разностной частоты после усилителя низкой частоты *УНЧ* поступают на частотный анализатор *ЧА*.

Скорость движущегося объекта, зная расстояние и время, определим по формуле (1.5):

$$U = R/\tau, \quad (1.5)$$

где R – дальность до объекта, м;

τ – время запаздывания, с.

Выделим достоинства и недостатки частотного метода, которые представлены в таблице 1.1.

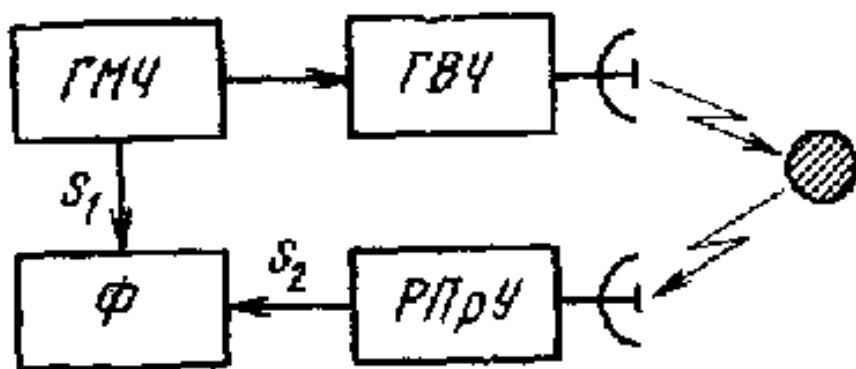
Таблица 1.1 – Достоинства и недостатки частотного метода

Достоинства	Недостатки
измерение малых дистанций, возможность разрешения объектов по дальности	применение двух антенн
использование маломощного передатчика	ухудшение чувствительности приёмника из-за поступления через антенну в приемный тракт излучения передатчика, который подвержен случайным изменениям
малая пиковая мощность зондирующего сигнала	к линейности изменения частоты предъявляются высокие требования

1.1.2 Фазовый метод

Фазовый (когерентный) метод радиолокации основывается на выделении и анализе разности фаз отправленного и отражённого сигналов [3], в следствии возникает эффект Доплера, при отражении сигнала от движущегося объекта.

Передающее устройство может работать как в импульсном режиме, так и непрерывно. Одним из основных преимуществ метода является то, что с его помощью можно наблюдать только движущие объекты, что позволяет исключить помехи, возникающие от неподвижных объектов, которые расположены между приёмной аппаратурой и целью или за ней [3]. На рисунке 1.3 представлен генератор масштабной частоты ГМЧ, с помощью которого модулируют по амплитуде колебания генератора высокой частоты ГВЧ, излучаемые в пространство.



ГМЧ – генератор масштабной частоты; ГВЧ – генератор высокой частоты; Ф – фазометр; РПРЧ – радиоприемное устройство

Рисунок 1.3 – Структурная схема фазового метода

На фазометр Φ с ГМЧ поступает зондирующий сигнал, который определяется по формуле (1.6):

$$S_1 = A_1 \cdot \sin(\omega_m \cdot t + \varphi_0), \quad (1.6)$$

Зондирующий сигнал, являющийся непрерывным гармоническим колебанием, и сигнал с выхода приемника, который без учета шумов можно определить по формуле (1.7) в виде:

$$S_2 = A_2 \cdot \sin[\omega_m \cdot (t - \tau) + \varphi_0 + \varphi_{от} + \varphi_d], \quad (1.7)$$

где ω_m – масштабная частота, Гц;
 φ_0 – начальная фаза, рад;
 τ – время запаздывания сигнала, с;

$\varphi_{от}$ – фазовый сдвиг, возникающий при отражении радиоволн от объекта, рад;

$\varphi_{д}$ – фазовый сдвиг сигнала в цепях дальномера, рад.

Разность фаз сигналов S_1 и S_2 определяется по формуле (1.8):

$$\varphi_p = \omega_m \cdot \tau - \varphi_{от} - \varphi_{д}, \quad (1.8)$$

Поэтому время запаздывания будет определяется в соответствии с формулой (1.9):

$$\tau = (\varphi_p + \varphi_{от} + \varphi_{д}) / \omega_m, \quad (1.9)$$

И, следовательно, дальность до объекта определим по формуле (1.10):

$$R = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c \cdot (\varphi_p + \varphi_{от} + \varphi_{д})}{2 \cdot \omega_m}, \quad (1.10)$$

Предварительно определив сдвиг фаз $\varphi_{от}$ и $\varphi_{д}$, можно измерить, разность фаз φ_p и найти дальность. Выражение (1.9) справедливо также при работе с ответчиком. В этом случае под $\varphi_{от}$, следует понимать фазовый сдвиг сигнала в цепях ответчика [3].

Фазовый сдвиг $\varphi_{д}$, можно исключить при калибровке $PД$, когда часть сигнала с выхода $УРЧ$ (входит в состав ГВЧ, который представлен на рисунке 1.3 не показан) подается на вход приемника $РПрУ$, а фазометр измеряет $\varphi_p = \varphi_{д}$. Изменение фазы при отражении сигнала $\varphi_{от}$ сильно влияет на точность, так как при отражении от металлов и диэлектриков $\varphi_{от}$ меняется на 180 градусов. Поэтому работают в режиме модуляции сигнала.

Скорость движущегося объекта, зная расстояние и время, определим по формуле (1.11):

$$U = R / \tau, \quad (1.11)$$

где R – дальность до объекта, м;

τ – время запаздывания, с.

Таблица достоинств и недостатков фазового метода представлена в таблице 1.2 [3].

Таблица 1.2 – Достоинства и недостатки фазового метода

Достоинства	Недостатки
Малая пиковая мощность генерируемых колебаний благодаря непрерывности излучения	отсутствует разрешение объектов по дальности
точность не зависит от доплеровского сдвига частоты отражения	ухудшение чувствительности приёмника вследствие проникновения через антенну в приёмный тракт излучения передатчика, подверженного случайным изменениям
Простота измерителя	
измерение малых дальностей	использование двух антенн

1.1.3 Импульсный метод

Импульсный метод измерения скорости основывается на определении времени запаздывания характерного изменения амплитуды, принимаемого радиолокационного сигнала. Антенна РЛС посылает мощный радиоимпульс, который отражается от цели и ей же принимается. Скорость распространения СВЧ сигнала, в виде которого распространяется радиоимпульс, много больше скорости цели, поэтому в хорошем приближении цель можно считать неподвижной. Тогда время, за которое радиосигнал достигнет цели – $t_{\text{прямого}}$ равняется времени, за которое отраженный сигнал достигнет антенны РЛС – $t_{\text{отр}}$ ($t_{\text{прямого}} = t_{\text{отр}} = t$) [4].

Сигнал, испущенный антенной РЛС вернется на нее в отраженном виде через время, определяемое по формуле (1.12):

$$t_D = t_{\text{прямого}} + t_{\text{отр}} = 2t, \quad (1.12)$$

СВЧ сигналы распространяются с постоянной скоростью, поэтому $D = c \cdot t$. Если учесть, что скорость распространения СВЧ сигнала в воздухе примерно равна его скорости распространения в вакууме – c . Учтем предыдущее выражение, и запишем равенство, в зависимости от времени запаздывания t_D , определяющее дальность D по формуле (1.13):

$$D = \frac{c \cdot t_D}{2}, \quad (1.13)$$

Для того, чтобы постоянно определять дальность, РЛС должна испускать периодическую последовательность импульсов, работать в импульсном режиме. Структурная схема представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Структурная схема импульсного метода

Система синхронизации определяет импульсную работу РЛС. Она формирует видеоимпульсы через постоянные промежутки времени T_u . T_u называют периодом повторения импульса. Система синхронизации определяет период работы – один цикл определения дальности [4].

Передатчик включается получив очередной импульс от системы синхронизации и на промежутке времени τ_u формирует сигнал требуемой мощности, амплитуды и частоты. τ_u называют длительностью импульса.

На протяжении времени длительности импульса антенный переключатель направляет излучаемый сигнал на антенну. Затем переключается на приемник. Система ждет конца периода отраженного сигнала. На переключение антенна затрачивает определенное время [4].

Приемник выделяет огибающую, принятого сигнала и передает на оконечное устройство.

Оконечное устройство обычно выполняется в виде ЭЛТ, на экране которой расстояние между двумя соседними разновысокими пиками соответствует расстоянию до цели. В случае выполнения окончного устройства на ЭЛТ, система синхронизации управляет работой генератора пилообразного напряжения, который выходит на горизонтально отклоняющую пластину. В то время как сигнал с приемника подается на вертикально отклоняющую.

Скорость движущегося объекта, зная расстояние и время, определим по формуле (1.14):

$$U = R/\tau, \quad (1.14)$$

где R – дальность до объекта, м;

τ – время запаздывания, с.

Достоинства и недостатки данного метода представлены в таблице 1.3 [2].

Таблица 1.3 – Достоинства и недостатки импульсного метода

Достоинства	Недостатки
РЛС с одной антенной, которое позволяет сделать развязку передающего и приемного каналов	использование больших импульсных мощностей передатчика
простота индикаторного устройства	измерения малых дальностей невозможно
Измерение нескольких объектов по дальности	большой диапазон мёртвой зоны
простота излучаемых импульсов, которые длятся малое время, и принимаемых сигналов	

1.2 Эффект Доплера

Принцип действия ИС «Визир» основан на измерении разности частот между сигналом, излученным ИС, и сигналом, отраженным от находящегося в зоне контроля ТС (эффект Доплера).

Эффект Доплера наблюдается при движении друг относительно друга источника и приемника электромагнитных волн, происходит изменение частоты волны, которая регистрируется приемником. Эффект Доплера для электромагнитных волн основывается на специальной теории относительности [5].

Соотношение, которое описывает эффект Доплера для электромагнитных волн в вакууме, с учетом преобразований Лоренца, определяется по формуле (1.15):

$$\nu = \frac{\nu_0 \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}}}{1 + \left(\frac{U}{c}\right) \cos \theta}, \quad (1.15)$$

где c – скорость света, м/с;

U – скорость источника относительно приемника (наблюдателя), м/с;

θ – угол между направлением на источник и вектором скорости в системе отсчета приемника, рад;

ν_0 – излучающая частота электромагнитной волны, Гц;

ν – отраженная частота электромагнитной волны, Гц.

Релятивистская формула Доплера совпадает с классической формулой, если движение источника волн относительно приемника осуществляется при небольших скоростях [5].

При движении источника относительно приемника по соединяющей их прямой, то наблюдается продольный эффект Доплера. При сближении источника и приемника ($\theta = \pi$), определяется формулой (1.16):

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{U}{c}}{1 - \frac{U}{c}}} > v_0, \quad (1.16)$$

При взаимном удалении источника и приемника ($\theta = 0$), определяется по формуле (1.17):

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{U}{c}}{1 + \frac{U}{c}}} < v_0, \quad (1.17)$$

Релятивистская теория эффекта Доплера определяет существование поперечного эффекта Доплера, который наблюдается при выполнении условий $\theta = \frac{\pi}{2}$ и $\theta = \frac{3\pi}{2}$, когда источник движется перпендикулярно линии наблюдения (по окружности, приемник в центре), определяется по формуле (1.18):

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}} < v_0, \quad (1.18)$$

Поперечный эффект Доплера представляет чисто релятивистский эффект, поэтому он необъясним в классической физике.

Исходя из формулы (1.15), можно сделать вывод, что поперечный эффект Доплера пропорционален отношению $\frac{U^2}{c^2}$, следовательно, он значительно слабее продольного, который пропорционален $\frac{U}{c}$.

При разложении вектора относительной скорости на составляющие: одна обеспечивает продольный эффект, другая – поперечный эффект.

Поперечный эффект Доплера происходит из-за замедления времени в движущихся системах отсчета.

Правильность релятивистской формулы (1.15) и экспериментальная проверка существования эффекта Доплера была осуществлена американскими физиками Г. Айвсом и Д. Стилуэллом в 30-х гг. Американские физики

исследовали излучение атомов водорода с помощью спектрографа, которые разгонялись до $2 \cdot 10^6$ м/с. В 1938 г. их результаты были опубликованы. Поперечный эффект Доплера наблюдался в полном соответствии с релятивистскими преобразованиями частоты (спектр излучения атомов оказался сдвинут в низкочастотную область), что способствовало о замедлении времени в движущихся инерциальных системах отсчета [5].

Эффект Доплера широко применяется в науке и технике. В астрофизике это явление играет большую роль. Доплеровское смещение линий поглощения в спектрах звезд и туманностей позволило определять лучевые скорости $U' \cos \theta$ объектов по отношению к Земле, при $U \ll c$ по формуле (1.19):

$$U' \cos \theta \approx \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) c, \quad (1.19)$$

Далее рассмотрим технические характеристики измерителя скорости «Визир».

1.3 Технические характеристики измерителя скорости «Визир»

Измеритель скорости радиолокационный видеозаписывающий «Визир» (далее по тексту ИС), предназначен для измерения скорости движения транспортных средств, видеозаписи факта нарушения правил дорожного движения, визуального отображения на экране монитора, обработки, сохранения и воспроизведения видеозаписей. Измеритель скорости предназначен для контроля скоростного режима движения транспортных средств. Внешний вид измерителя скорости «Визир» представлен на рисунке 1.5 [2].



Рисунок 1.5 – Измеритель скорости «Визир»

Измеритель скорости состоит из двух основных компонентов: излучателя радиосигнала и приемника сигнала. Если направить прибор на движущуюся цель и включить его, он начнет посылать радиоволны в направлении цели, а затем улавливать отраженные волны. ИС фиксирует изменение частоты у отраженного сигнала, и уже по этому изменению вычисляет скорость цели.

Рабочие условия эксплуатации:

- температура окружающего воздуха от 0 до 60 °С;
- относительная влажность воздуха 98 % при температуре 25 °С;
- атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт.ст.).

Измеритель скорости имеет основные технические и метрологические характеристики [2]:

- измеритель скорости имеет максимальную дальность измерения скорости не менее 400 м;
- измеритель скорости обеспечивает селекцию ТС по скоростям их движения при разнице скоростей не менее 3 км/ч и соотношении их эффективных отражающих площадей не менее 1:10;
- диапазон измерения скорости движения от 20 до 205 км/ч;
- пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения скорости в стационарном режиме ± 1 км/ч;

- пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения скорости в патрульном режиме ± 2 км/ч;
- регулировка длительности записи от 5 до 60 с;
- скорость записи видеоизображения 3, 6, 12 кадр/с;
- режим фотографирования;
- ток потребления не более 1 А;
- напряжение питания от 9 до 16 В;
- рабочая частота излучения ИС $(24,15 \pm 0,10)$ ГГц;
- масса ИС, с аккумуляторным блоком, не более 1,5 кг;
- средний срок службы ИС (до списания) 6 лет.

ИС является средством измерения и, в соответствии с действующим законодательством, подлежит Государственной поверке. Поверка производится уполномоченными территориальными органами Госстандарта РФ по утвержденной методике. Межповерочный интервал – 2 года.

Далее рассмотрим нормируемые технические характеристики измерителей скорости.

1.4 Нормируемые технические характеристики измерителей скорости

В соответствии с ГОСТ Р 50856, стандарт устанавливает следующие нормируемые технические характеристики измерителей скорости.

Рабочую частоту излучения устанавливают по согласованию с Государственной комиссией по радиочастотам при Министерстве связи Российской Федерации.

Нестабильность частоты излучаемых сигналов при неизменных внешних условиях и неизменном напряжении питания за любой 15 минутный интервал времени после установления рабочего режима при работе измерителя скорости в нормальных условиях $\pm 1 \cdot 10^{-3}$.

Диапазон измеряемых скоростей, при этом нижнюю и верхнюю границы выбирают из диапазона от 10 до 100 км/ч. При необходимости диапазон измерения скорости допускается разделять на поддиапазоны.

Основная погрешность измерения скорости движения транспортных средств во всем диапазоне измеряемых скоростей, рабочем диапазоне температур и питающих напряжений не должна превышать $\pm (1 \text{ км/ч} + 1 \text{ ед.счета})$.

Дальность действия измерителя скорости, при этом нижнюю и верхнюю границы выбирают из диапазона от 10 до 500 м.

Мощность передатчика (излучения), при этом погрешность измерения мощности не должна превышать $\pm 10 \%$.

Значение селекции транспортных средств по направлению их движения (ослабление сигнала, отраженного от транспортных средств, противоположного направления), погрешность определения селекции не должна превышать $\pm 3 \text{ дБ}$.

Время единичного измерения скорости движения транспортных средств, находящихся на максимальной дальности, не более 1 мс.

Дискретность установки пороговых значений скорости движения (шкала измерителя скорости) устанавливают в ТЗ, ТУ и выбирают из ряда: 1; 2; 5; 10 км/ч.

Измерители скорости должны обеспечивать селекцию транспортных средств по скорости их движения при разности скоростей не более 10 км/ч.

Время установления рабочего режима выбирают из ряда: 1; 5; 15; 30 мин. Продолжительность непрерывной работы измерителя скорости выбирают из ряда: 8; 16; 24 ч.

Управление измерителем скорости может быть ручным, автоматическим или комбинированным (ручным и автоматическим).

При ручном управлении должны быть выполнены установка режимов и параметров измерителей скорости, их визуальная регистрация без применения вспомогательных средств и устройств, не входящих в комплект измерителя скорости, в соответствии.

При автоматическом управлении должна быть установлена и выполнена без участия оператора программа измерителя скорости без применения или с

применением средств и устройств, не входящих в комплект измерителя скорости.

При автоматическом управлении функции интерфейса для обеспечения работы измерителей скорости по каналу общего пользования должны соответствовать требованиям ГОСТ 26.003.

При комбинированном управлении должны быть выполнены требования, предъявляемые к ручному и автоматическому управлению в соответствии ГОСТ Р 50856. Для контроля характеристик и проведения поверки рассмотрим методы и средства поверки радиолокационных измерителей скорости «Визир».

1. 5 Методы и средства поверки измерителя скорости «Визир»

Поверку измерителей скорости «Визир» выполняют согласно следующим операциям: внешний осмотр, опробование и определение метрологических параметров. Определение метрологических параметров включает в себя [6]:

- определение частоты излучения;
- определение дальности действия в стационарном режиме;
- определение диапазона измеряемых скоростей в стационарном режиме;
- определение погрешности измерения скорости в стационарном режиме;
- определение дальности действия в патрульном режиме;
- определение диапазона измеряемых скоростей в патрульном режиме;
- определение погрешности измерения скорости в патрульном режиме.

При проведении поверки должен применяться автоматизированный стенд для испытаний и поверки измерителей скорости радиолокационных «Сапсан 2», имеющий следующие технические характеристики:

- диапазон рабочих частот от 24,050 до 24,250 ГГц;
- погрешность измерения частоты ± 2 МГц;
- диапазон имитируемых скоростей от 20 до 400 км/ч;
- погрешность имитации скорости $\pm 0,1$ км/ч.

Автоматизированный стенд «Сапсан 2», предназначен для проведения поверки, испытаний и контроля метрологических характеристик

радиолокационных измерителей скорости транспортных средств, имеющих рабочую частоту 10 и 24 ГГц.

Стенд имеет ручной, полуавтоматический и автоматический режимы работы. Внешний вид представлен на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Внешний вид стенда

Для работы стенда необходим персональный компьютер со специальным программным обеспечением. Тестирование происходит по утвержденным методикам поверки и занимает менее 30 секунд. Сменные модуляторы обеспечивают работу стенда в 3-х см и 2-х см частотных диапазонах. В зависимости от комплекта поставки стенд имеет в своем составе сменные модуляторы отраженного сигнала на 10 ГГц и 24 ГГц [7].

Принцип действия стенда основан на управлении величиной переменной реактивной нагрузки в тракте модулятора отраженного сигнала, по которому происходит распространение электромагнитной волны, излученной проверяемым ИС. Частота модуляции величины реактивной нагрузки соответствует требуемым имитируемым скоростям движения. Полоса модуляции соответствует направлению движения, а амплитуда модуляции соответствует дальности до имитируемого движущего транспортного средства (далее - ТС).

Стенд состоит из универсальных модуляторов отраженного сигнала, процессорного блока управления, безэховой камеры, ложементов и кронштейна, кабелей соединительных.

Рабочие условия применения [7]:

- температура окружающего воздуха, от минус 10 до + 40 °С;
- относительная влажность воздуха при 30 °С, составляет 90 % ;
- атмосферное давление от 630 до 800 мм рт. ст.

Стенд позволяет проводить поверку ИС как в лабораторных условиях, так и непосредственно на объектах в местах стационарной установки ИС.

Для поверки ИС в лабораторных условиях, ИС с помощью ложемента устанавливаются в безэховую камеру, на которую монтируется модулятор отраженного сигнала соответствующего частотного диапазона. К модулятору отраженного сигнала подключается процессорный блок управления и персональный компьютер, управляющий режимами работы стенда. Для поверки стационарно установленных на объекте ИС используется кронштейн навесной, закрепленный непосредственно на ИС. К кронштейну навесному монтируется модулятор отраженного сигнала соответствующего частотного диапазона, который подключается к процессорному блоку и персональному компьютеру, управляющему режимами работы стенда [7].

Во время подготовки к поверке и при ее проведении необходимо соблюдать правила техники безопасности и производственной санитарии в электронной промышленности, правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок и требования, установленные технической документацией на используемые при поверке эталонные и вспомогательные средства поверки [6].

При проведении поверки работа связана с открытыми СВЧ мощности, что требует соблюдения мер предосторожности во избежание облучения оператора СВЧ облучением.

При проведении поверки запрещено находиться перед ИС вдоль оси излучения на расстояние ближе, чем 1 метр в течение более 30 минут.

Внешний осмотр

При проведении внешнего осмотра устанавливают соответствие ИС следующим требованиям:

- комплектация ИС соответствует паспорту;
- на корпусе ИС нанесены: наименование изделия, наименование или товарный знак предприятия-изготовителя, заводской номер изделия и год выпуска, знак утверждения типа;
- на поверхности оболочек кабелей отсутствуют повреждения;
- ИС не имеет механических повреждений, влияющих на его работу;
- на металлических частях ИС нет следов коррозии.

Результаты поверки по данному пункту считаются положительными, если обеспечивается выполнение выше перечисленных пунктов.

Опробование

Устанавливается ИС в стенд, отключается в стенде режим имитации движения ТС. Затем включается питание ИС.

Вынимается ИС из стенда и просматривается видеоизображения окружающей обстановки на дисплее ИС.

ИС считается прошедшим опломбирование, если обеспечивается наличие видеоизображения окружающей обстановки на дисплее ИС [6].

Определение метрологических параметров

Определение частоты излучения ИС. На стенд, автоматизированный для испытаний и поверки радиолокационных измерителей скорости «Сапсан 2», отключается имитация движения ТС. Затем ИС переводят в режим непрерывного излучения и измеряют частоту излучения ИС.

Результаты поверки по данному пункту считаются положительными, если измеренная частота излучения лежит в пределах $(24,15 \pm 0,10)$ ГГц.

Для определения дальности действия, диапазона измеряемых скоростей и погрешности измерения скорости в стационарном режиме, нужно установить на ИС следующие параметры:

- дальность действия – максимальная;

- режим работы ИС – стационарный;
- направление движения цели – встречное (приближение).

Устанавливаем на стенде значения имитируемых скоростей из таблицы 1.4, результаты поверки считаются положительными, если измеренные значения скоростей соответствуют указанным в таблице 1.4 с погрешностью не более ± 1 км/ч [6].

Таблица 1.4 – Значения имитируемых скоростей при стационарном режиме работы ИС

Параметры стационарного режима работы	Значения имитируемых скоростей		
Скорость первого ТС установленная, км/ч	30	90	210
Скорость второго ТС установленная, км/ч	20	80	200
Дальность до первого ТС, м	300	300	300
Дальность до второго ТС, м	150	150	150
Скорость ТС измеренная, км/ч	30	90	210

Для определения дальности действия, диапазона измеряемых скоростей и погрешности измерения скорости в патрульном режиме, нужно установить на ИС следующие параметры:

- дальность действия – максимальная;
- режим работы ИС – патрульный;
- направление движения цели – встречное (приближение).

Устанавливаем на стенде значения имитируемых скоростей из таблицы 1.5, результаты поверки считаются положительными, если измеренные значения скоростей соответствуют указанным в таблице 1.5 с погрешностью не более ± 2 км/ч [6].

Таблица 1.5 – Значения имитируемых скоростей при патрульном режиме работы ИС

Параметры патрульного режима работы	Значения имитируемых скоростей	
Скорость первого ТС установленная, км/ч	60	80
Скорость второго ТС установленная, км/ч	150	210
Дальность до первого ТС, м	100	100
Дальность до второго ТС, м	300	300
Скорость патрульного ТС измеренная, км/ч	60	80
Скорость ТС измеренная, км/ч	90	130

Далее рассмотрим метрологическую надежность средств измерений.

2 Метрологическая надежность средств измерений

Одним из основных показателей качества СИ, необходимым для поддержания его в работоспособном состоянии, является надежность. Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность СИ характеризует его поведение с течением времени и является обобщенным понятием, включающим в себя стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность (для восстанавливаемых СИ) и сохраняемость [8]. Рассмотрим более подробно основные понятия теории метрологической надежности средств измерений.

2.1 Основные понятия теории метрологической надежности средств измерений

В процессе эксплуатации метрологические свойства средств измерений изменяются по причине старения элементов, которые входят в средства измерений. Такие изменения носят случайный характер, вследствие которого в некоторый момент времени может привести к отказам, т.е. к невозможности эксплуатации и выполнения своих функций средством измерения. Отказы делятся на метрологические и неметрологические [8].

Неметрологическим называется отказ, который не связан с изменением МХ средств измерений. Такие изменения носят явный характер, изменения проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения поверки. Также неметрологический отказ характеризуется поломкой прибора.

Метрологическим называется отказ, который вызван выходом МХ, указанных в нормативно-технической документации из установленных допустимых границ. Чаще всего, метрологические отказы происходят чаще, чем неметрологические. Вследствие этого возникает необходимость разработки

специальных методов для их обнаружения. Метрологические отказы подразделяются на внезапные и постепенные.

Внезапным метрологическим отказом называется отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Эти отказы в силу их случайности невозможно прогнозировать. Их последствия (сбой показаний, потеря чувствительности и т.п.) легко обнаруживаются в ходе эксплуатации прибора, т.е. по характеру проявления они являются явными. Особенностью внезапных отказов является постоянство во времени их интенсивности. Это дает возможность применять для анализа этих отказов классическую теорию надежности. В связи с этим в дальнейшем отказы такого рода не рассматриваются [8].

Постепенным называется отказ, характеризующийся монотонным изменением одной или нескольких МХ. По характеру проявления постепенные отказы являются скрытыми и могут быть выявлены только по результатам периодического контроля СИ. В дальнейшем рассматриваются именно такие отказы.

Метрологическая исправность средства измерения есть состояние СИ, при котором все нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям. Способность СИ сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации называется метрологической надежностью. Специфика проблемы метрологической надежности состоит в том, что для нее основное положение классической теории надежности о постоянстве во времени интенсивности отказов оказывается неправомерным. Современная теория надежности ориентирована на изделия, обладающие двумя характерными состояниями: работоспособное и неработоспособное. Постепенное изменение погрешности СИ позволяет ввести сколь угодно много работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования, определяемым степенью приближения погрешности к допустимым граничным значениям [8].

Понятие метрологического отказа является в известной степени условным, поскольку определяется допуском на МХ, который в общем случае может меняться в зависимости от конкретных условий. Зафиксировать точное время наступления метрологического отказа ввиду скрытого характера его проявления невозможно, в то время как явные отказы, с которыми оперирует классическая теория надежности, могут быть обнаружены в момент их возникновения. Все это потребовало разработки специальных методов анализа метрологической надежности СИ.

Надежность СИ характеризует его поведение с течением времени и является обобщенным понятием, включающим в себя стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность (для восстанавливаемых СИ) и сохраняемость [8].

Стабильность СИ является качественной характеристикой, отражающей неизменность во времени его МХ. Она описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешности. Метрологическая надежность и стабильность являются различными свойствами одного и того процесса старения СИ. Стабильность несет больше информации о постоянстве метрологических свойств средств измерений.

Безотказностью называется свойство СИ непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Она характеризуется двумя состояниями: работоспособным и неработоспособным. Однако для сложных измерительных систем может иметь место и большее число состояний, поскольку не всякий отказ приводит к полному прекращению их функционирования. Отказ является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности СИ. Это обуславливает случайную природу показателей безотказности, главным из которых является распределение времени безотказной работы СИ.

Долговечностью называется свойство СИ сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния. Работоспособное состояние – это такое состояние СИ, при котором все его МХ

соответствуют нормированным значениям. Предельным называется состояние СИ, при котором его применение недопустимо.

Ремонтопригодность – свойство СИ, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, восстановлению и поддержанию его работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Оно характеризуется затратами времени и средств на восстановление СИ после метрологического отказа и поддержание его в работоспособном состоянии [8].

Далее рассмотрим математические модели изменения во времени погрешности средств измерений.

2.2 Математические модели изменения во времени погрешности средств измерений

2.2.1 Линейная модель изменения погрешности

Представим общую модель погрешности $\Delta_{0,95}(t)$ в виде, представленной по формуле (2.1):

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + F(t), \quad (2.1)$$

где Δ_0 – начальная погрешность СИ;

$F(t)$ – случайная функция времени для совокупности СИ данного типа, которая обусловлена физико-химическими процессами постепенного износа и старения элементов и блоков.

Не представляется возможным получить точное выражение для функции $F(t)$ исходя из физических моделей процессов старения. Поэтому, основываясь на данных, полученных в результате экспериментальных исследований изменения погрешностей во времени, функцию $F(t)$ аппроксимируют той или иной математической зависимостью [8].

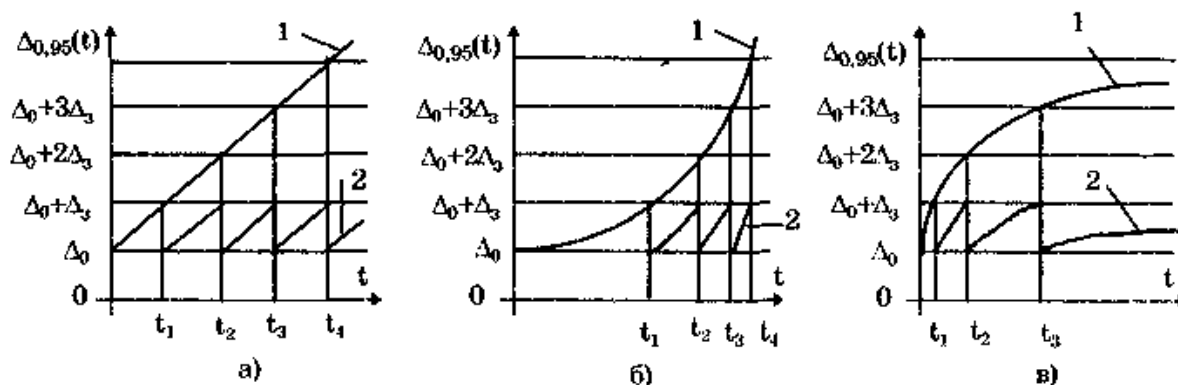
Простейшей моделью изменения погрешности является – линейная, представленная по формуле (2.2):

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + vt, \quad (2.2)$$

где v – скорость изменения погрешности.

Данная модель описывает старение СИ в возрасте от одного до пяти лет. Использование модели в других диапазонах времени невозможно, что связано с указанной выше формулой и частотой отказов экспериментальных значений [8].

Метрологические отказы могут возникать периодически. Механизм их периодичности показан рисунке 2.1, а. Прямая линия 1 показывает изменение 95% - ного квантиля при линейном законе. На рисунке 7, б и в, показаны изменения 95% - ного квантиля при экспоненциальном законе изменения погрешности.



Линейный (а) и экспоненциальный (б, в) законы изменения погрешности

Рисунок 2.1 – Законы изменения погрешности

При метрологическом отказе погрешность $\Delta_{0,95}(t)$ превышает значение, рассчитанное по формуле (2.3):

$$\Delta_{пр} = \Delta_0 + n\Delta_3, \quad (2.3)$$

где Δ_3 – значение запаса нормируемого предела погрешности, которое необходимо для обеспечения долговременной работоспособности СИ;

Δ_0 – исходное значение погрешности;

n – число отказов (или ремонтов) СИ.

При каждом метрологическом отказе производится ремонт прибора, и его погрешность возвращается к исходному значению Δ_0 . По прошествии времени $T_p = t_i - t_{i-1}$ возникает отказ (моменты t_1, t_2, t_3 и т.д.), после которого нужно снова

производить ремонт. Следовательно, процесс изменения погрешности СИ, описывается ломаной линией 2 на рис. 2.1, а, которая может быть представлена уравнением (2.4):

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + n\Delta_3, \quad (2.4)$$

Если число отказов является целым значением, то это уравнение описывает дискретные точки на прямой 1, представленные на рисунке 2.1, а. Если же считать, что число отказов (n) может принимать дробные значения, то формула (2.4) будет описывать изменения погрешности $\Delta_{0,95}(t)$ при отсутствии отказов на всей прямой 1.

С ростом скорости v наблюдается увеличение частоты метрологических отказов. Частота имеет сильную зависимость от запаса нормируемого значения погрешности Δ_3 по отношению к фактическому значению погрешности средства измерений Δ_0 на момент изготовления или окончания ремонта прибора. На скорость изменения v и запас погрешности Δ_3 имеются совершенно различные практические возможности воздействия. Скорость старения определяется существующей технологией производства. Запас погрешности для первого межремонтного интервала можно определить с помощью решений, которые принимаются производителем СИ, а для всех последующих межремонтных интервалов — принимаются уровнем культуры ремонтной службы пользователя [8].

Если метрологическая служба предприятия обеспечивает при ремонте погрешность СИ, которая равна погрешности Δ_0 на момент изготовления, то частота метрологических отказов будет минимальной. Если же при ремонте обеспечивается выполнение условия $\Delta_0 \approx (0,9... 0,95) \Delta_{пр}$, тогда погрешность может выйти за пределы допустимых значений уже в ближайшие месяцы эксплуатации СИ и большую часть межповерочного интервала оно будет эксплуатироваться с погрешностью, которая превышает его класс точности. Поэтому основным практическим средством достижения долговременной метрологической исправности средства измерений является обеспечение

достаточно большого запаса Δ_3 , который нормируется по отношению к пределу $\Delta_{пр}$.

При постепенном непрерывном расходе этого запаса, который обеспечивает на некоторый определенный период времени метрологически исправное состояние СИ. Ведущие приборостроительные заводы обеспечивают $\Delta_3 = (0,4...0,5) \Delta_{пр}$, что при средней скорости старения $\nu = 0,05 A_{II} / год$ позволяет получать межремонтный интервал $T_p = \Delta_3 / \nu = 8... 10$ лет и частоту отказов $\omega = 1/T_p = 0,1... 0,125 \text{ год}^{-1}$.

Если изменять погрешность СИ в соответствии с формулой (2.2), то все межремонтные интервалы T_p будут равны между собой, а частота метрологических отказов $\omega = 1/T_p$ будет постоянной в течение всего срока эксплуатации. Однако проведенные экспериментальные исследования показали, что на практике это не выполняется [8].

2.2.2 Экспоненциальная модель изменения погрешности

На практике для одних приборов межремонтные интервалы уменьшаются, для других интервалы увеличиваются. Это связано с тем, что с течением времени погрешность СИ экспоненциально может как возрастать, так и убывать. Если наблюдается ускоряющееся возрастание погрешности (рисунок 2.1,б), то каждый последующий межремонтный интервал будет короче предыдущего, следовательно, частота метрологических отказов $\omega(t)$ возрастет с течением времени. Если наблюдается замедленное возрастание погрешности (рисунок 2.1,в), то каждый последующий межремонтный интервал будет значительно длиннее предыдущего, частота метрологических отказов $\omega(t)$ будет убывать до нуля с течением времени [8].

Для случаев изменения погрешности во времени описываются на основе экспоненциальной модели. В ней частота метрологических отказов определяется по формуле (2.5):

$$\omega(t) = \omega_0 e^{at}, \quad (2.5)$$

где ω_0 – частота метрологических отказов на момент изготовления средства измерений (при $t = 0$), год⁻¹;

a – положительное или отрицательное ускорение процесса метрологического старения, год⁻¹.

Число отказов $n(t)$ определяется через частоту отказов $\omega(t)$ и при ее экспоненциальном изменении согласно формуле (2.6):

$$n(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau = \int_0^t \omega_0 e^{a\tau} d\tau = \frac{\omega_0}{a} (e^{at} - 1), \quad (2.6)$$

Тогда изменение во времени погрешности СИ с учетом формулы (2.2) имеет вид, представленный формулой (2.7):

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + n(t)\Delta_3 = \Delta_0 + \Delta_3 \frac{\omega_0}{a} (e^{at} - 1), \quad (2.7)$$

где Δ_0 – начальное значение погрешности;

Δ_3 – абсолютный запас погрешности;

ω_0 – начальная частота метрологических отказов;

a – ускорение процесса старения.

Указанная зависимость показана кривыми 1 на рисунке 2.1, б и в.

Практическое использование формулы (2.7) требует знания четырех параметров: начального значения погрешности, абсолютного запаса погрешности, начальной частоты метрологических отказов при $t = 0$ и ускорения процесса старения. Уравнения для определения выше сказанных параметров, которые получаем из формулы (2.7), оказываются трансцендентными, что существенно затрудняет их применение [8].

Для упрощения использования уравнения (2.7), его необходимо разложить в ряд экспоненциальную функцию, затем взять три первых члена этого разложения. В итоге зависимость погрешности СИ от времени будет представлена по формуле (2.8):

$$\Delta_{0,95}(t) = \frac{\Delta_0 + \Delta_3 \omega_0 t + \Delta_3 \omega_0 a t^2}{2} = \Delta_0 + vt + \frac{a_{\Delta} t^2}{2}, \quad (2.8)$$

где v — начальная скорость возрастания погрешности, %;

a_{Δ} — абсолютное значение ускорения изменения погрешности, %.

В частном случае при $a = 0$, формула (2.8) имеет вид линейного уравнения (2.2).

С помощью выражения (2.8) можно увидеть физический смысл, получаемый путем аппроксимации экспериментальных данных о погрешностях СИ в период 10-15 лет возможно получить оценки коэффициентов ν и a_Δ , а затем по ним рассчитать параметры уравнения (2.7) в виде $\omega_0 = \nu/\Delta_3$ и $a = a_\Delta/(\Delta_3\omega_0)$.

Чтобы рассчитать, время наступления метрологического отказа, нужно свестись к определению моментов пересечения кривой $\Delta_{0,95}(t)$ постоянных уровней $\Delta_0 + \Delta_3$, $\Delta_0 + 2\Delta_3$, ..., $\Delta_0 + n\Delta_3$. Уровни могут быть найдены после решения совместных уравнений (2.4) и (2.5). Момент наступления n -го отказа и соответственно длительность межремонтных периодов можно определить по формулам (2.9) и (2.10):

$$t_n = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{an}{\omega_0} + 1 \right), \quad (2.9)$$

$$T_n = \frac{1}{a} \ln \left(1 - \frac{1}{\frac{\omega_0}{a} + n} \right). \quad (2.10)$$

Срок службы СИ — это календарное время, прошедшее с момента его изготовления до конца эксплуатации. При положительном ускорении процесса старения (рисунок 2.1,б) с увеличением срока службы происходит увеличение частоты отказов, по истечении времени $T_{сл}$ его приходится чаще ремонтировать, эксплуатация становится экономически невыгодной, так как дешевле купить новое средство измерения. Экономическая целесообразность ремонта определяется отношением средней стоимости одного ремонта c_p к стоимости c_u нового средства измерений, названного относительной глубиной ремонта $c = c_p/c_u$. Срок службы СИ, определяется по формуле (2.11):

$$T_{сл} = \frac{1}{\sqrt{c\omega_0 a}}, \quad (2.11)$$

Если решить полученное уравнение совместно с выражением (2.9), можно рассчитать общее число отказов (ремонтов) СИ в течение всего срока эксплуатации [8].

Межремонтный период увеличивается при отрицательном ускорении процесса старения СИ. После некоторого числа ремонтов n_{Σ} СИ становится бесконечным, метрологические отказы перестают возникать и СИ работает пока морально не устареет. В этом случае ($a < 0$) число метрологических отказов определяется по формуле (2.12):

$$n_{\Sigma} = n_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} n(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\omega_0}{a} (e^{nt} - 1) = -\frac{\omega_0}{a}, \quad (2.12)$$

Погрешность СИ стремится к пределу, равному, согласно (2.7),

$$\Delta_{0,95}(\infty) = \Delta_0 - \frac{\omega_0}{a} \Delta_{\Sigma}, \quad (2.13)$$

Экспоненциальная модель процесса старения позволяет описать изменения погрешности СИ при увеличении его возраста от года и практически до бесконечности. Однако, как и любая модель, она имеет ряд недостатков. Для СИ с отрицательным ускорением процесса старения она прогнозирует при $t \rightarrow \infty$ стремление погрешности к предельному значению (2.13). В то же время для СИ с положительным ускорением модель прогнозирует неограниченное возрастание погрешности с течением времени, что противоречит практике [8].

2.2.3 Логистическая модель изменения погрешности

Некоторые из недостатков экспоненциальной модели старения удается устранить при использовании логистической модели. Кривые, которые описывают процесс изменения погрешности СИ и частоты отказов, приведены на рисунке 2.2. В области малых значений погрешности (0,2 - 1 %) зависимость $\Delta_{0,95}(t)$ экспоненциально ускоряется, а в области больших значений — экспоненциально замедляется. При больших значениях времени зависимость выходит на некоторый предельный уровень, по достижению которого погрешность не возрастает. Кривая частоты метрологических отказов (рисунок 8) при малых значениях времени возрастает, достигая своего максимума при некотором значении T_c , после которого начинается спад до нуля [8]. Участки кривой $\Delta_{0,95}(t)$, соответствующие диапазонам 1 и 2 изменения времени, не обязательно должны быть симметричны относительно точки (Δ_c, T_c) . Ускорения

процесса старения a_1 и a_2 , как правило, имеют разные значения. Частота метрологических отказов на участках 1 и 2 определяется по формулам (2.14) и (2.15):

$$\omega_1(t) = \omega_{01} e^{a_1 t}, \quad (2.14)$$

$$\omega_2(t) = \omega_{02} e^{a_2 t}. \quad (2.15)$$

где ω_{01} , ω_{02} — начальные частоты метрологических отказов на участках 1 и 2.

Абсцисса точки, разделяющей два участка, вычисляется по формуле (2.16):

$$T_c = \frac{\ln\left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}}\right)}{a_1 - a_2}, \quad (2.16)$$

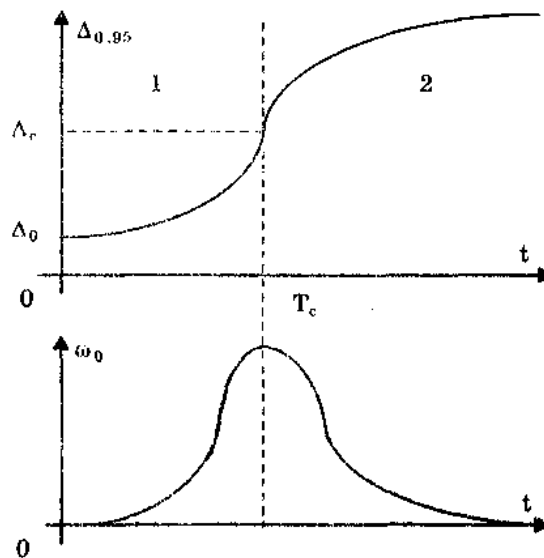


Рисунок 2.2 - Логистическая модель временного изменения погрешности

Используя параметры логистической модели процесса старения, можно обоснованно прогнозировать моменты наступления метрологических отказов t_n и изменение с возрастом наработки на отказ T_n . Момент наступления n -го метрологического отказа при $t < T_c$ и $t > T_c$ определяется соответственно по формулам (2.17) и (2.18):

$$t_n = \frac{1}{a_1} \ln \left(1 + \frac{a_1}{\omega_{01}} n \right), \quad (2.17)$$

$$t_n = \frac{1}{a_2} \ln \frac{a_2(n - n_\infty)}{\omega_{02}}. \quad (2.18)$$

$$\text{при } n_{\infty} = \frac{\omega_{01}}{a_1} (e^{a_1 T_c} - 1) - \frac{\omega_{02}}{a_2} e^{a_2 T_c}.$$

Длительность межремонтных интервалов при $t < T_c$ и $t > T_c$, вычисляется по формулам (2.19) и (2.20):

$$T_n = -\frac{1}{a_1} \ln \left(1 - \frac{1}{n - \omega_{01}/a_1} \right), \quad (2.19)$$

$$T_n = \frac{1}{a_1} \ln \frac{n_{\infty} - n}{n_{\infty} - n + 1}. \quad (2.20)$$

где n - порядковый номер ремонта.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что длительность межремонтных интервалов, начиная со второго, монотонно и ускоренно возрастает. Отличие первого интервала от последующих состоит в том, что на нем СИ работает с запасом нормируемого значения погрешности, обеспеченным изготовителем. На остальных межремонтных интервалах этот запас обеспечивается ремонтными службами предприятия. Многократное превышение первого интервала по сравнению с остальными указывает на то, что ремонтные запасы погрешности Δ_p предусматриваются во много раз меньшими, чем заводские запасы Δ_3 [8].

Кривая изменения погрешности $\Delta_{0,95}(t)$ в случае использования логистической модели при $t < T_c$ и $t > T_c$ вычисляется по формулам (2.21) и (2.22):

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + \Delta_3 \frac{\omega_{01}}{a_1} (e^{a_1 t} - 1), \quad (2.21)$$

$$\Delta_{0,95}(t) = \Delta_0 + \Delta_3 \frac{\omega_{01}}{a_1} (e^{a_1 T_c} - 1) + \Delta_p [n(t) - n(T_c)]. \quad (2.22)$$

$$\text{где } n(t) = n_{\infty} - \frac{\omega_{02}}{a_2} e^{a_2 t}$$

При практическом использовании приведенных в этом разделе формул необходимо помнить, что входящие в них параметры являются оценками, которые должны быть получены на основе обработки экспериментальных данных для достаточно представительных выборок однотипных СИ. Поэтому сами оценки параметров имеют определенный разброс, поскольку представляют собой некоторые средние оценки обследованной группы

приборов, у отдельных экземпляров которых могут быть весьма существенные индивидуальные отклонения постоянных $\Delta_{0,95}$, Δ_3 , ω_{01} и a_i . В связи с этим все рассчитанные по приведенным формулам показатели должны рассматриваться лишь как средние прогнозируемые величины [8].

К недостаткам логистической модели можно отнести то, что она не позволяет описывать изменение погрешности СИ от момента изготовления прибора до нескольких месяцев его эксплуатации. Это связано с тем, что как в линейной, так и в экспоненциальной модели значение начальной погрешности считалось постоянной величиной, неизменной с момента изготовления СИ. В действительности указанная погрешность образуется из различных составляющих, возникающих на начальных стадиях эксплуатации СИ.

Одним из вариантов описания изменения погрешности СИ, начиная с первых секунд его эксплуатации, является спектральное описание погрешности. Оно позволяет подробно описать многие особенности изменения погрешности прибора. Главный недостаток спектрального описания состоит в очень большом объеме экспериментальных данных, необходимых для построения спектральных кривых.

Рассмотренные выше модели являются разновидностями модели нестационарного монотонного процесса изменения погрешности во времени. Их общий недостаток — идеализация случайных процессов изменения МХ средства измерений, которые представляются монотонными. При этом не учитываются флуктуационные, обратимые процессы изменения параметров и характеристик приборов. Данный недостаток в той или иной степени устранен в полиномиальной и диффузионной марковской моделях, а также в модели на основе процессов авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего [8].

2.3 Межповерочные и межкалибровочные интервалы

Одной из основных форм поддержания СИ в метрологически исправном состоянии является его периодическая поверка. Периодическая поверка СИ проводится метрологическими службами согласно правилам, которые установлены нормативно-технической документацией. Периодичность поверки должна быть согласована с требованиями к надежности СИ. Поверку необходимо проводить через оптимально выбранные интервалы времени, называемые межповерочными интервалами (МПИ).

Поверка СИ позволяет выявить момент наступления метрологического отказа, результаты которой показывают, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Величина МПИ должна быть оптимальной, поскольку частые поверки приводят к экономическим и трудовым затратам на их организацию и проведение, а редкие — могут привести к метрологическим отказам, связанным с повышением погрешности измерений [9].

Межповерочные (межкалибровочные) интервалы устанавливаются, исходя из календарного времени СИ, изменение метрологических характеристик связано со старением и не зависит от интенсивности эксплуатации СИ. Значения МПИ рекомендуется выбирать из ряда предпочтительных чисел: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 9; 12; 6 К месяцев (К — целое положительное число). СИ у которых изменение M_X является следствием износа их элементов, которые зависят от интенсивности эксплуатации, МПИ назначаются в значениях наработки.

При нахождении МПИ выбирается M_X , которая определяет состояние метрологической исправности средств измерений. В качестве таких характеристик, наиболее часто используются основная погрешность, СКО случайной составляющей погрешности и некоторые другие. Если состояние метрологической исправности определяют несколько M_X , то из них выбирается та, по которой обеспечивается наибольший процент брака при поверках [9].

Далее рассмотрим критерии назначения межповерочных и межкалибровочных интервалов.

2.3.1 Критерии назначения межповерочных и межкалибровочных интервалов

В качестве критериев назначения МПИ принимают следующие показатели метрологической надежности [10]:

- вероятность метрологической исправности СИ в заданный момент времени t - $P_{mi}(t)$;
- коэффициент метрологической исправности $K_{mi}(t)$;
- вероятность безотказной работы за заданное время t - $P(t)$.

2.3.1.1 Вероятность метрологической исправности

При проведении калибровки СИ (или поверке способом калибровки) происходит восстановление начальных значений МХ [10]. Поэтому плотность распределения погрешности СИ по совокупности СИ одного типа после проведения их калибровки равна начальной плотности $\varphi_0(\xi)$, а через наработку (время) t после калибровки - $\varphi_1(\xi)$ определяется по формуле (2.23):

$$\varphi_1(\xi) = \varphi_0[\psi(t, \xi)] \frac{\partial \psi(t, \xi)}{\partial \xi}, \quad (2.23)$$

Отсюда получим, что вероятность метрологической исправности в момент времени t СИ, которые подвергаются калибровке, вычисляется по формуле (2.24):

$$\begin{aligned} P_{mi}(t) = P(t, -\Delta, \Delta) &= \int_{-\Delta}^{\Delta} \varphi_1(\xi) d\xi = \int_{-\Delta}^{\Delta} \varphi_0[G(t, \xi)] \frac{\partial G(t, \xi)}{\partial \xi} d\xi = \\ &= \Phi[G(t, \Delta)] - \Phi[G(t, -\Delta)] = \Phi\left(\frac{\Delta^F - m_F(t)}{\sigma_F(t)}\right) - \Phi\left(\frac{-\Delta^F - m_F(t)}{\sigma_F(t)}\right), \end{aligned} \quad (2.24)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-0,5y^2} dy$ - интегральная функция нормального распределения;

$G(t, \xi)$ – функция дрейфа МХ СИ;

Δ - предел допускаемых значений МХ.

При проведении поверки СИ, целью является определение пригодности к применению по критерию точности Δ , бракуются и заменяются новыми или отремонтированными такие экземпляры, погрешность которых превышает эту норму. Остальные экземпляры не подвергаются калибровке, покидают поверочную лабораторию с той же погрешностью, с которой они поступили на поверку. Совокупность СИ, которые поступают в каждый момент времени в поверочную лабораторию, включает экземпляры с разной наработкой после последней калибровки: проработавшие один временной интервал T , два интервала $2T$, три интервала $3T$ и т.д. Оценка метрологической надежности такой совокупности СИ возможна в рамках модели установившегося процесса эксплуатации, который характеризуется следующими условиями [10]:

- длительность процесса эксплуатации СИ данного типа (при условии замены экземпляров, выработавших свой срок службы, новыми СИ) не ограничена;

- средний возраст совокупности СИ, поступающих на поверку, а также средние показатели точности и метрологической надежности этой совокупности остаются постоянными.

2.3.1.2 Коэффициент метрологической исправности

Коэффициент метрологической исправности $K_{mi}(t)$ равен средней доле времени на интервале $[0, t)$, в течение которого СИ находится в метрологически исправном состоянии. Исходя из определения, $K_{mi}(t)$ вычисляется по формуле (2.25):

$$K_{mi}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T P_{mi}(t) dt, \quad (2.25)$$

2.3.1.3 Вероятность работы без метрологических отказов (вероятность безотказной работы)

Наиболее сложной задачей прогнозирования метрологической надежности является вычисление вероятности безотказной работы. Вероятность безотказной работы оценивается по формуле (2.26):

$$P(t) = \begin{cases} \frac{\Phi[G(t,\Delta)] - \Phi[G(t,-\Delta)]}{\Phi[G(0,\Delta)] - \Phi[G(0,-\Delta)]}, & \text{или} \\ \frac{\Phi[G(t,\Delta)]}{\Phi[G(0,\Delta)]} & \text{при допущении о одностороннем дрейфе.} \end{cases} \quad (2.26)$$

Данное выражение является не точным, т.к. оно оценивает не вероятность безотказной работы на интервале $[0, T]$, а вероятность метрологической исправности СИ в конечный момент этого интервала. Следовательно, она может служить оценкой $P(t)$ только для таких процессов дрейфа, у которых все траектории являются монотонными функциями. Задача такого подхода заключается в оценивании вероятности выбросов нестационарных случайных процессов за заданные границы.

В то же время оказывается возможным найти решение этой задачи для случайных процессов с траекториями, непрерывно дифференцируемыми с вероятностью 1. Строгий математический вывод искомого выражения достаточно сложный. Поэтому ограничимся выражением, получившимся в ходе доказательства, по формуле (2.27):

$$P(t) = \lim_{k \rightarrow \infty} P_{\text{ми}}(0, t_1, \dots, t_{2^k}) = \frac{\Phi[B(t)] - \Phi[A(t)]}{\Phi[G(0,\Delta)] - \Phi[G(0,-\Delta)]}, \quad (2.27)$$

где $A(t) = \max_{\tau \in [0, t]} [G(\tau, -\Delta)]$, $B(t) = \min_{\tau \in [0, t]} [G(\tau, \Delta)]$

3 Метрологическая надежность измерителей скорости «Визир»

3.1 Анализ полноты статистических данных по метрологической надежности измерителей скорости «Визир»

В настоящее время обстановка на дорогах и автомагистралях требует постоянного наблюдения. Основными средствами контроля скоростного режима являются радиолокационные приборы. В связи с этим актуальной является проблема обеспечения единства измерений в области измерения скорости средств измерений и их метрологическая надежность. Надежность средств измерений характеризует его поведение с течением времени, включающим в себя стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность (для восстанавливаемых средств измерений) и сохраняемость.

На предприятии имеется парк приборов измерителей скорости, за которыми ведется наблюдение и собираются статистические данные, которые представлены в следующей форме, представленной в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Форма сбора данных на предприятии

№	Наименование	Заводской номер	Дата предыдущей поверки	Дата следующей поверки
1	Измеритель скорости «Визир»	0000000	11.09.2014	11.09.2016

Дополнительно регистрируется альтернативный признак годности прибора по результатам поверки и факт нахождения прибора в ремонте.

Рассмотрим более подробно показатели надежности измерителей скорости «Визир».

Для измерителей скорости движения в соответствии с ГОСТ Р 50856 установлена следующая номенклатура показателей надежности:

- значение наработки на отказ (T_0);

- гамма – процентный ресурс (γ);
- среднее время восстановления (T_0);
- гамма – процентный срок сохраняемости (γ);
- межповерочный интервал;
- значение вероятности отсутствия скрытых отказов за межповерочный интервал ($P\tau$).

Была произведена возможность оценки каждого показателя надежности, учитывая статистические данные, представленные в таблице 3.1. В таблице 3.2 представлены результаты обработки исходных данных за 1 год.

Таблица 3.2 – Статистические данные

Число измерителей скорости, работоспособных в начальный момент времени	Число измерителей скорости, отказавших в течении времени t	Суммарная наработка, ч	Математическое ожидание числа отказов	Вероятность безотказной работы	Среднее время восстановления, ч
56	5	8760	0,108	0,91	336

Значение наработки на отказ – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа, в соответствии с ГОСТ 27.002, определяется по формуле (3.1):

$$T_0 = \frac{t}{M(r(t))} = \frac{8760}{0,108} = 81111,11 \text{ ч}, \quad (3.1)$$

где t – суммарная наработка, ч;

$r(t)$ – число отказов, наступивших в течение этой наработки;

$M(r(t))$ – математическое ожидание этого числа.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа, в соответствии ГОСТ 27.002.

Гамма – процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью, выраженной в процентах. Гамма – процентный срок сохраняемости - срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью, выраженной в процентах, в соответствии ГОСТ 27.002, определяются по формуле (3.2):

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}, \quad (3.2)$$

где $P(t_\gamma)$ – вероятность безотказной работы

В среднем из 56 измерителей скорости типа «Визир» около 91 % проработают более 744 ч. Вероятность $P(t_\gamma)$ изменяется от нуля до единицы. Чем она ближе к единице, тем выше безотказность работы измерителей скорости. На практике допустимым считается значение $P(t_\gamma) > 0,9$.

Следовательно, подставив вероятность безотказной работы в формулу (3.2) получим:

$$\gamma = P(t_\gamma) \cdot 100 = 91 \%,$$

Наработка измерителей скорости составляет 91 %, в течение, которого объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью безотказной работы 0,91. Гамма – процентный ресурс при значении доверительной вероятности $\gamma = 0,91$ должен быть не менее 744 ч. Гамма – процентный срок сохраняемости при значении доверительной вероятности $\gamma = 0,91$ должен быть не менее 0,085 года (1 месяца).

Межповерочный интервал – интервал времени, указанный в документе по поверке, в течение которого СИ должно удовлетворять установленным требованиям, в соответствии с ГОСТ 27.002. В соответствии с паспортом на прибор, поверка осуществляется 1 раз в 24 мес.

Значение вероятности отсутствия скрытых отказов за межповерочный интервал для всех показателей надежности составляет 0,9. Критерием отказа является выход значений параметров измерителя скорости за допустимые пределы.

Для оценки показателей надежности был выбран экспериментальный метод, использующий статистические данные о работе измерителей скорости движения «Визир» за весь период эксплуатации, как это рекомендовано в разделе 3.6, в соответствии с ГОСТ 27.410. Анализ формы сбора данных на предприятии позволил оценить все показатели надежности в соответствии с ГОСТ Р 50856 для измерителей скорости движения транспортных средств. Анализ показал, что форма сбора данных в корректировке не нуждается.

Далее проведем исследование значений межповерочного интервала измерителей скорости «Визир».

3.2 Исследование значений межповерочного (межкалибровочного) интервала измерителей скорости «Визир»

В настоящее время в России количество дорожных происшествий произошедших по вине водителей недопустимо велико. По данным сайта ГИБДД МВД России [1] за 2015 год по этой причине погибло 19011 человек. Львиную долю нарушений ПДД, повлекших тяжелые последствия, составляет превышение скорости движения. Контроль скоростного режима производится с помощью радиолокационных измерителей скорости. Значительную долю парка измерителей скорости составляют радиолокационные видеозаписывающие измерители скорости «Визир» [2]. Так как штрафные санкции за превышение скорости налагаются на основе данных приборов, необходимо быть уверенным в их метрологической исправности. Метрологически исправным считается средство измерения, при котором все нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям, в соответствии с РМГ 29.

Для контроля метрологической исправности средств измерений (СИ) проводятся периодические поверки и калибровки, при которых осуществляется контроль соответствия метрологических характеристик (МХ) установленным требованиям. Межповерочный (межкалибровочный) интервал (МПИ) являются

важнейшим параметром, определяющим уровень метрологической надежности СИ. С одной стороны, чем больше МПИ, тем ниже этот уровень, с другой стороны, чем меньше МПИ, тем больше финансовые затраты на проведение поверок (калибровок), а также издержки логистики, которые связаны с изъятием СИ с мест их непосредственной эксплуатации. Следовательно, нужно определить оптимальное значение МПИ.

Наиболее естественным критерием оптимальности МПИ является экономический критерий, который определяется условным минимумом экономических издержек эксплуатации СИ, складывающихся из убытков из-за недостаточной точности измерений (1 тип) и расходов, связанных с проведением поверок, калибровок и ремонтов СИ, забракованных при поверке (2 тип). Наиболее просто оценить издержки 2-го типа, например, для Томской области для парка приборов «Визир» издержки с учетом цен на поверку организации, аккредитованной на оказание услуг по поверке, в зависимости от МПИ представлены на кривой, на рисунке 3.1 – кривая 1. При этом не учитывались затраты на транспортировку и ремонт приборов. Издержки 1-го типа точно определить не удастся, но можно произвести их оценку. По данным ГИБДД Томской области общее количество нарушений ПДД в 2015 году составило 152534 случая. Данных по процентному составу нарушений ПДД нет, поэтому оценим превышение скорости в 30 % от общего количества нарушений (50000). Приборами «Визир» фиксируется 25 % нарушений (12500). Минимальный штраф 500 р. Таким образом, общая сумма штрафов 6 250 тыс. руб. К концу МПИ допускается до 5 % метрологически неисправных приборов (заданный уровень риска). Пусть все метрологические неисправности состоят в погрешности определения скорости автомобиля. Тогда сумма неправомерно собранных штрафов составит 5 % от общей суммы (по данным 2015 года) – 312 тыс.руб. На рисунке 3.1 – кривая 2.

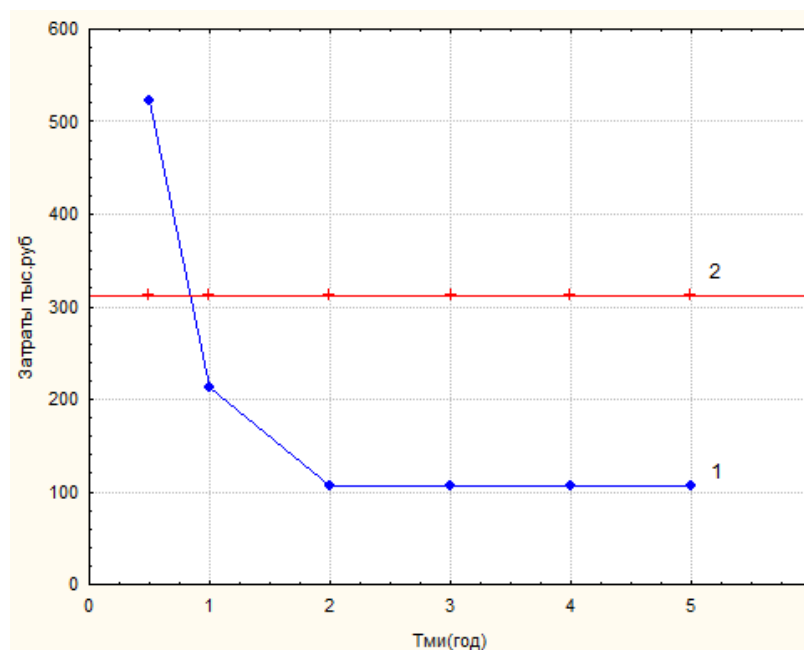


Рисунок 3.1 – Определение оптимального МПИ по экономическому критерию

В случае завышенного значения МПИ процент метрологически неисправных приборов в конце межповерочного интервала увеличится, следовательно, во столько же раз увеличатся издержки 2-го типа. В связи этим, необходимо проводить корректировку МПИ на базе поверочных данных организаций аккредитованных на право проведения поверок.

3.2.1 Корректировка межповерочного (межкалибровочного) интервала первой партии приборов

Результаты поверок измерителей скорости не содержат действительных метрологических характеристик, поэтому корректировку МПИ группы СИ будем проводить по альтернативному признаку годности СИ [10], в соответствии с ГОСТ 8.565 и РМГ 74. Предположим нормальное распределение погрешности СИ. Тогда расчеты проводятся по следующему алгоритму.

Сначала производится группировка поверок по порядковым номерам поверок, прошедшим после выпуска СИ из производства или ремонта: 1-я группа – СИ, которые поступили на 1-ю поверку после изготовления или

ремонта, 2-я группа – СИ, которые поступили на 2-ю поверку, и т.д. Тем самым в каждой i -й группе окажется N_i результатов измерений погрешности СИ или ее нестабильности за предыдущий МПИ x_j , ($j=1, \dots, N_i$).

Затем подсчитываются статистические вероятности p_i , признания СИ годным по результатам i -й поверки. Рассмотрим два варианта изменения закона распределения погрешности средства измерения – «веерный» и «линейный».

Для «веерного» случайного процесса изменение параметров распределения погрешности СИ во времени имеет вид (3.3):

$$m(t) = 0; \quad \sigma^2(t) = \beta_1^2 + \beta_2^2 t, \quad (3.3)$$

Далее определяется оценка МПИ для «веерного» случайного процесса – T_1 .

С начала, находятся статистические оценки параметров дрейфа погрешности при допущении (3.4):

$$m(iT) = 0, \quad \sigma(iT) = \Delta/\lambda_{0.5(1+p_i)}, \quad (3.4)$$

где i – номер поверки;

$\lambda_{0.5(1+p_i)}$ – квантиль нормального распределения уровня $0,5(1 + p_i)$.

Далее по значениям $\sigma^2(iT)$ методом наименьших квадратов оцениваем коэффициенты регрессии (3.3). Затем определяем значение T_1 .

Для «линейного» случайного процесса изменение параметров распределения погрешности СИ во времени имеет вид (3.5):

$$m(t) = m_1 + m_2 t; \quad \sigma^2(t) = \sigma^2(0), \quad (3.5)$$

Далее определяется оценка МПИ для «линейного» случайного процесса – T_2 .

Находим статистические оценки параметров дрейфа погрешности при допущении (3.6):

$$m(iT) = \Delta - \lambda_{p_i} \sigma(0), \quad \sigma(iT) = \sigma(0), \quad (3.6)$$

где λ_{p_i} – квантиль нормального распределения уровня p_i ;

$\sigma(0)$ – СКО распределения погрешности СИ (если оно неизвестно, принимают $\sigma(0) = \Delta/3$).

Далее по значениям $m(iT)$ методом наименьших квадратов оцениваем коэффициенты регрессии (3.5). Затем определяем значение T_2 .

В качестве значения МПИ принимаем минимальное значение полученных оценок: $T = \min [T_1, T_2]$.

Для приборов «Визир» производится контроль соответствия их погрешности пределу допускаемой относительной погрешности $\Delta = \pm 0,2 \%$. Срок службы $T_{\text{сл}} = 6$ лет. На предприятии эксплуатировались 56 приборов СИ при МПИ $T = 2$ года. Суммарное количество приборов равное 56, было разделено на 2 партии, чтобы пока 1-я партия приборов отправлялась на поверку, 2-я партия фиксировала нарушения скоростного режима. Рассмотрим первую партию из 32 приборов, которые отправлялись на поверку в 2012 г. и 2014 г. По результатам поверки в 2012 г. были выписаны 2 извещения о непригодности приборов, а в 2014 г. 5 извещений. При этом средства измерения, введенные в эксплуатацию взамен забракованных, не учитываются. Данные расчетов первой партии приборов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Выборочные оценки параметров моделей дрейфа измерителей скорости «Визир» первой партии

Номер i поверки	Число n годных СИ	p_i	$0,5(1 + p_i)$	Веерный случайный процесс			Линейный случайный процесс	
				$\lambda_{0,5(1+p_i)}$	$\sigma(iT)$	$\sigma^2(t)$	λ_{p_i}	$m(iT)$
0	32	1	1	3	0,0666	0,0044	3	0
1	30	0,9375	0,9687	1,862	0,1074	0,0115	1,5341	0,0977
2	25	0,7812	0,8906	1,2297	0,1626	0,0264	0,7763	0,1482

Для гипотезы о «веерном» случайном процессе полагают $m(iT) = 0$. Для гипотезы о «линейном» случайном процессе полагают

$\sigma(iT) = 0,0666$. Методом наименьших квадратов найдем математическое ожидание для «линейной» модели дрейфа: $m_1=0,0079$; $m_2=0,0371$. Аналогичным способом находим дисперсию для «всерной» модели дрейфа: $\beta_1=0,0031$; $\beta_2=0,0055$.

Найдем условную вероятность метрологической исправности СИ при условии, что наработка СИ ограничена сроком службы СИ (в нашем случае 6 лет), по следующей формуле (3.7):

$$P_{\text{ми}}(T) = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{\sum_{s=1}^n Q_s(T)}{1 + \sum_{s=1}^n Q_s(T)}, \quad (3.7)$$

где $n = T_{\text{сл}}/T$ – целая часть отношения срока службы к МПИ;

$T_{\text{сл}}$ – срок службы СИ;

T – МПИ;

$Q_s(T)$ – вероятность метрологической исправности приборов s -ой группы ($s=1, 2, \dots$).

Варьируя T мы будем получать разные значения $P_{\text{ми}}(T)$. Например, если выбирать значение МПИ равное паспортному значению 2 года, то для расчета $P_{\text{ми}}(T)$ используется следующий алгоритм.

Пусть $T = 2$ г. $n = \frac{6}{2} = 3$. Найдем математическое ожидание и дисперсию при «всерной» модели:

$$m_1(iT) = 0, \quad \sigma(iT) = \sqrt{0,0031 + 0,0055 i \cdot T}, \quad i = 0,1,2,3.$$

Далее найдем вероятности метрологической исправности СИ при «всерной» модели для приборов s -ой группы по формуле (3.8):

$$Q_s(T) = \Phi \left[\frac{0,2}{\sqrt{0,0031 + 0,0055 \cdot s \cdot T}} \right] - \Phi \left[-\frac{0,2}{\sqrt{0,0031 + 0,0055 \cdot s \cdot T}} \right], \quad (3.8)$$

где $\Phi(x)$ – интегральная функция стандартного нормального распределения;

$T = 2$ года;

$s = 1,2,3$.

Результаты приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Данные расчета $P_{ми}(T)$ для $T = 2$ года

i – номер поверки	$m_1(iT)$	$\sigma(iT)$
1	0	0,119
2	0	0,158
3	0	0,19
$Q_1(T)$	$Q_2(T)$	$Q_3(T)$
0,907	0,793	0,707

Вычисляем значение вероятности метрологической исправности при «веерной» модели дрейфа $P_{ми}(T)$ по формуле (3.7):

$$P_{ми}(T) = \frac{4}{3} \cdot \frac{2,407}{1 + 2,407} = 0,942.$$

Сравниваем $P_{ми}(T)$ с нормируемым значением критерия $P_{ми}^* = 0,95$. Если метрологическая надежность СИ окажется выше требуемой, $P_{ми}(T) > P_{ми}^*$. Тогда МПИ увеличивают, иначе МПИ уменьшают. Значения МПИ выбирают из членов ряда предпочтительных чисел – 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 5; 6 лет. В нашем случае метрологическая надежность СИ ниже требуемой $P_{ми}(T) < P_{ми}^*$ ($0,942 < 0,95$), выбираем значение $T_{новое} < T$, ближайшее к T снизу – 1,75 г. Далее находим $T_{новое}$ для «линейной модели» по следующему алгоритму. Далее процесс повторяется до тех пор пока, $P_{ми}(T) \approx P_{ми}^*$.

Найдем математическое ожидание и дисперсию при «линейной» модели:

$$m_2(iT) = 0,0079 + 0,0371 \cdot i \cdot T, \quad \sigma(iT) = 0,0666, \quad i = 0,1,2,3.$$

Далее найдем вероятности метрологической исправности СИ при «линейной» модели для приборов s -ой группы по формуле (3.9):

$$Q_{s_2}(T) = \Phi \left[\frac{0,2 - (0,0079 + 0,0371 \cdot i \cdot T)}{0,0666} \right] - \Phi[-3], \quad (3.9)$$

где $\Phi(x)$ – интегральная функция стандартного нормального распределения;

$T = 2$ года;

$s = 1,2,3$.

Результаты приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Данные расчета $P_{ми}(T)$ для $T = 2$ года

i – номер поверки	$m_2(iT)$	$\sigma(iT)$
1	0,082	0,0666
2	0,156	0,0666
3	0,231	0,0666
$Q_1(T)$	$Q_2(T)$	$Q_3(T)$
0,962	0,745	0,325

Вычисляем значение вероятности метрологической исправности при «линейной» модели дрейфа $P_{ми}(T)$ по формуле (3.7):

$$P_{ми}(T) = \frac{4}{3} \cdot \frac{2,032}{1 + 2,032} = 0,894.$$

Сравниваем $P_{ми}(T)$ с нормируемым значением критерия $P_{ми}^* = 0,95$. Если метрологическая надежность СИ окажется выше требуемой, $P_{ми}(T) > P_{ми}^*$. Тогда МПИ увеличивают, иначе МПИ уменьшают. Значения МПИ выбирают из членов ряда предпочтительных чисел – 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 5; 6 лет. В нашем случае метрологическая надежность СИ ниже требуемой $P_{ми}(T) < P_{ми}^*$ ($0,894 < 0,95$), выбираем значение $T_{новое} < T$, ближайшее к T снизу – 1,75 г. Далее процесс повторяется до тех пор пока, $P_{ми}(T) \approx P_{ми}^*$. Результаты расчета приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Расчет МПИ измерителей скорости «Визир»

МПИ T , г	$P_{ми}(T)$ веерная модель	$P_{ми}(T)$ линейная модель	$\min\{P_{ми}(T) \text{ веерная}, P_{ми}(T) \text{ линейная}\}$
2	0,942	0,894	0,894
1,75	0,949	0,887	0,887
1,5	0,957	0,925	0,925
1,25	0,964	0,935	0,935
1	0,971	0,953	0,953
0,75	0,978	0,966	0,966

Результаты показывают, что оптимальным по критерию $P_{mi}^*=0,95$ является МПИ $T=1$ год.

3.2.2 Корректировка межповерочного (межкалибровочного) интервала второй партии приборов

Рассмотрим вторую партию из 24 приборов, которые отправлялись на поверку в 2013 г. и 2015 г. По результатам поверки в 2013 г. были выписаны 3 извещения о непригодности приборов, а в 2015 г. 7 извещений. При контроле соответствия их погрешности пределу допускаемой относительной погрешности $\Delta = \pm 0,2 \%$. Срок службы $T_{сл} = 6$ лет. При этом СИ, введенные в эксплуатацию взамен забракованных не учитываются. Данные расчетов второй партии приборов представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Выборочные оценки параметров моделей дрейфа измерителей скорости «Визир» второй партии

Номер i поверки	Число n годных СИ	p_i	$0,5(1 + p_i)$	Всерный случайный процесс			Линейный случайный процесс	
				$\lambda_{0.5(1+p_i)}$	$\sigma(iT)$	$\sigma^2(t)$	λ_{p_i}	$m(iT)$
0	24	1	1	3	0,0666	0,0044	3	0
1	21	0,875	0,9375	1,5341	0,1304	0,0169	1,1503	0,1233
2	14	0,5833	0,7917	0,8122	0,2462	0,0606	0,2103	0,1859

Для гипотезы о «всерном» случайном процессе полагают $m(iT) = 0$. Для гипотезы о «линейном» случайном процессе полагают $\sigma(iT) = 0,0666$. Методом наименьших квадратов найдем математическое ожидание для «линейной» модели дрейфа: $m_1=0,0101$; $m_2=0,0465$. Аналогичным способом находим дисперсию для «всерной» модели дрейфа: $\beta_1 = -0,0007$; $\beta_2=0,014$.

Найдем условную вероятность метрологической исправности СИ при условии, что наработка СИ ограничена сроком службы СИ (в нашем случае 6 лет), по следующей формуле (3.10):

$$P_{\text{ми}}(T) = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{\sum_{s=1}^n Q_s(T)}{1 + \sum_{s=1}^n Q_s(T)}, \quad (3.10)$$

где $n = T_{\text{сл}}/T$ – целая часть отношения срока службы к МПИ;

$T_{\text{сл}}$ – срок службы СИ;

T – МПИ;

$Q_s(T)$ – вероятность метрологической исправности приборов s -ой группы ($s=1, 2, \dots$).

Варьируя T мы будем получать разные значения $P_{\text{ми}}(T)$. Например, если выбирать значение МПИ равное паспортному значению 2 года, то для расчета $P_{\text{ми}}(T)$ используется следующий алгоритм.

Пусть $T = 2$ г. $n = \frac{6}{2} = 3$. Найдем математическое ожидание и дисперсию при «веерной» модели:

$$m_1(iT) = 0, \quad \sigma(iT) = \sqrt{-0,0007 + 0,014 i \cdot T}, \quad i = 0,1,2,3.$$

Далее найдем вероятности метрологической исправности СИ при «веерной» модели для приборов s -ой группы по формуле (3.11):

$$Q_s(T) = \Phi \left[\frac{0,2}{\sqrt{-0,0007 + 0,014 \cdot s \cdot T}} \right] - \Phi \left[-\frac{0,2}{\sqrt{-0,0007 + 0,014 \cdot s \cdot T}} \right], \quad (3.11)$$

где $\Phi(x)$ – интегральная функция стандартного нормального распределения;

$T = 2$ года;

$s = 1,2,3$.

Результаты приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Данные расчета $P_{\text{ми}}(T)$ для $T = 2$ года

i – номер поверки	$m_1(iT)$	$\sigma(iT)$
1	0	0,165
2	0	0,235

Продолжение таблицы 3.8

i – номер поверки	$m_1(iT)$	$\sigma(iT)$
3	0	0,289
$Q_1(T)$	$Q_2(T)$	$Q_3(T)$
0,773	0,604	0,511

Вычисляем значение вероятности метрологической исправности при «всерной» модели дрейфа $P_{ми}(T)$ по формуле (3.10):

$$P_{ми}(T) = \frac{4}{3} \cdot \frac{1,889}{1 + 1,889} = 0,872.$$

Сравниваем $P_{ми}(T)$ с нормируемым значением критерия $P_{ми}^* = 0,95$. Если метрологическая надежность СИ окажется выше требуемой, $P_{ми}(T) > P_{ми}^*$. Тогда МПИ увеличивают, иначе МПИ уменьшают. Значения МПИ выбирают из членов ряда предпочтительных чисел – 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 5; 6 лет. В нашем случае метрологическая надежность СИ ниже требуемой $P_{ми}(T) < P_{ми}^*$ ($0,872 < 0,95$), выбираем значение $T_{новое} < T$, ближайшее к T снизу – 1,75 г. Далее процесс повторяется до тех пор пока, $P_{ми}(T) \approx P_{ми}^*$.

Найдем математическое ожидание и дисперсию при «линейной» модели:

$$m_2(iT) = 0,0101 + 0,0465 \cdot i \cdot T, \quad \sigma(iT) = 0,0666, \quad i = 0,1,2,3.$$

Далее найдем вероятности метрологической исправности СИ при «линейной» модели для приборов s -ой группы по формуле (3.12):

$$Q_{s_2}(T) = \Phi \left[\frac{0,2 - (0,0101 + 0,0465 \cdot i \cdot T)}{0,0666} \right] - \Phi[-3], \quad (3.12)$$

где $\Phi(x)$ – интегральная функция стандартного нормального распределения;

$T = 2$ года;

$s = 1,2,3$.

Результаты приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Данные расчета $P_{ми}(T)$ для $T = 2$ года

i – номер поверки	$m_2(iT)$	$\sigma(iT)$
1	0,103	0,0666
2	0,196	0,0666
3	0,289	0,0666
$Q_1(T)$	$Q_2(T)$	$Q_3(T)$
0,927	0,523	0,091

Вычисляем значение вероятности метрологической исправности при «линейной» модели дрейфа $P_{ми}(T)$ по формуле (3.10):

$$P_{ми}(T) = \frac{4}{3} \cdot \frac{2,539}{1 + 2,539} = 0,808.$$

Сравниваем $P_{ми}(T)$ с нормируемым значением критерия $P_{ми}^* = 0,95$. Если метрологическая надежность СИ окажется выше требуемой, $P_{ми}(T) > P_{ми}^*$. Тогда МПИ увеличивают, иначе МПИ уменьшают. Значения МПИ выбирают из членов ряда предпочтительных чисел – 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 5; 6 лет. В нашем случае метрологическая надежность СИ ниже требуемой $P_{ми}(T) < P_{ми}^*$ ($0,808 < 0,95$), выбираем значение $T_{новое} < T$, ближайшее к T снизу – 1,75 г. Далее процесс повторяется до тех пор пока, $P_{ми}(T) \approx P_{ми}^*$. Результаты расчета приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Расчет МПИ измерителей скорости «Визир»

МПИ T , г	$P_{ми}(T)$ веерная модель	$P_{ми}(T)$ линейная модель	$\min\{P_{ми}(T) \text{ веерная}, P_{ми}(T) \text{ линейная}\}$
2	0,872	0,808	0,872
1,75	0,889	0,809	0,809
1,5	0,902	0,861	0,861
1,25	0,919	0,880	0,880

Продолжение таблицы 3.10

МПИ T , г	$P_{mi}(T)$ веерная модель	$P_{mi}(T)$ линейная модель	$\min\{P_{mi}(T) \text{ веерная}, P_{mi}(T) \text{ линейная}\}$
1	0,934	0,911	0,911
0,75	0,951	0,934	0,934
0,5	0,967	0,957	0,957

Результаты показывают, что оптимальным по критерию $P_{mi}^*=0,95$ является МПИ $T=0,5$ года.

3.2.3 Корректировка межповерочного (межкалибровочного) интервала всей партии приборов

Рассмотрим всю партию приборов, состоящую из 56 измерителей скорости. При контроле соответствия их погрешности пределу допускаемой относительной погрешности $\Delta = \pm 0,2 \%$. Срок службы $T_{cl} = 6$ лет, МПИ $T = 2$ года. При этом средства измерения, введенные в эксплуатацию взамен забракованных, не учитываются. Данные расчетов представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Выборочные оценки параметров моделей дрейфа измерителей скорости «Визир»

Номер i поверки	Число n годных СИ	p_i	$0,5(1 + p_i)$	Веерный случайный процесс			Линейный случайный процесс	
				$\lambda_{0,5(1+p_i)}$	$\sigma(iT)$	$\sigma^2(t)$	λ_{p_i}	$m(iT)$
0	56	1	1	3	0,0666	0,0044	3	0
1	51	0,9107	0,9553	1,6992	0,1177	0,0138	1,3451	0,1103
2	39	0,6964	0,8482	1,0287	0,1944	0,0377	0,5141	0,1657

Для гипотезы о «веерном» случайном процессе полагают $m(iT) = 0$. Для гипотезы о «линейном» случайном процессе полагают $\sigma(iT) = 0,0666$. Методом наименьших квадратов найдем математическое ожидание для «линейной» модели дрейфа: $m_1 = 0,0092$; $m_2 = 0,0414$. Аналогичным способом находим дисперсию для «веерной» модели дрейфа: $\beta_1 = 0,002$; $\beta_2 = 0,0083$.

Найдем условную вероятность метрологической исправности СИ при условии, что наработка СИ ограничена сроком службы СИ (в нашем случае 6 лет), по следующей формуле (3.13):

$$P_{\text{ми}}(T) = \frac{n+1}{n} \cdot \frac{\sum_{s=1}^n Q_s(T)}{1 + \sum_{s=1}^n Q_s(T)}, \quad (3.13)$$

где $n = T_{\text{сл}}/T$ – целая часть отношения срока службы к МПИ;

$T_{\text{сл}}$ – срок службы СИ;

T – МПИ;

$Q_s(T)$ – вероятность метрологической исправности приборов s -ой группы ($s=1, 2, \dots$).

Варьируя T , мы будем получать разные значения $P_{\text{ми}}(T)$. Например, если выбирать значение МПИ равное паспортному значению 2 года, то для расчета $P_{\text{ми}}(T)$ используется следующий алгоритм.

Пусть $T = 2$ года, $n = \frac{6}{2} = 3$. Найдем математическое ожидание и дисперсию при «веерной» модели:

$$m_1(iT) = 0, \quad \sigma(iT) = \sqrt{0,002 + 0,0083 i \cdot T}, \quad i = 0, 1, 2, 3.$$

Далее найдем вероятности метрологической исправности СИ при «веерной» модели для приборов s -ой группы по формуле (3.14):

$$Q_s(T) = \Phi \left[\frac{0,2}{\sqrt{0,002 + 0,0083 \cdot s \cdot T}} \right] - \Phi \left[-\frac{0,2}{\sqrt{0,002 + 0,0083 \cdot s \cdot T}} \right], \quad (3.14)$$

где $\Phi(x)$ – интегральная функция стандартного нормального распределения;

$T = 2$ года;

$s = 1, 2, 3$.

Результаты приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Данные расчета $P_{ми}(T)$ для $T = 2$ года

i – номер поверки	$m_1(iT)$	$\sigma(iT)$
1	0	0,136
2	0	0,187
3	0	0,227
$Q_1(T)$	$Q_2(T)$	$Q_3(T)$
0,856	0,712	0,619

Вычисляем значение вероятности метрологической исправности при «всерной» модели дрейфа $P_{ми}(T)$ по формуле (3.13):

$$P_{ми}(T) = \frac{4}{3} \cdot \frac{2,187}{1+2,187} = 0,915.$$

Сравниваем $P_{ми}(T)$ с нормируемым значением критерия $P_{ми}^* = 0,95$. Если метрологическая надежность СИ окажется выше требуемой, $P_{ми}(T) > P_{ми}^*$. Тогда МПИ увеличивают, иначе МПИ уменьшают. Значения МПИ выбирают из членов ряда предпочтительных чисел – 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 5; 6 лет. В нашем случае метрологическая надежность СИ ниже требуемой $P_{ми}(T) < P_{ми}^*$ ($0,915 < 0,95$), выбираем значение $T_{новое} < T$, ближайшее к T снизу – 1,75 года. Далее процесс повторяется до тех пор пока, $P_{ми}(T) \approx P_{ми}^*$.

Найдем математическое ожидание и дисперсию при «линейной» модели:

$$m_2(iT) = 0,0092 + 0,0414 \cdot i \cdot T, \quad \sigma(iT) = 0,0666, \quad i = 0,1,2,3.$$

Далее найдем вероятности метрологической исправности СИ при «линейной» модели для приборов s -ой группы по формуле (3.15):

$$Q_{s_2}(T) = \Phi \left[\frac{0,2 - (0,0092 + 0,0414 \cdot i \cdot T)}{0,0666} \right] - \Phi[-3], \quad (3.15)$$

где $\Phi(x)$ – интегральная функция стандартного нормального распределения;

$T = 2$ года;

$s = 1,2,3$.

Результаты приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Данные расчета $P_{ми}(T)$ для $T = 2$ года

i – номер поверки	$m_2(iT)$	$\sigma(iT)$
1	0,092	0,0666
2	0,1748	0,0666
3	0,2576	0,0666
$Q_1(T)$	$Q_2(T)$	$Q_3(T)$
0,947	0,646	0,193

Вычисляем значение вероятности метрологической исправности при «линейной» модели дрейфа $P_{ми}(T)$ по формуле (3.13):

$$P_{ми}(T) = \frac{4}{3} \cdot \frac{1,786}{1+1,786} = 0,855.$$

Сравниваем $P_{ми}(T)$ с нормируемым значением критерия $P_{ми}^* = 0,95$. Если метрологическая надежность СИ окажется выше требуемой, $P_{ми}(T) > P_{ми}^*$. Тогда МПИ увеличивают, иначе МПИ уменьшают. Значения МПИ выбирают из членов ряда предпочтительных чисел – 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 5; 6 лет. В нашем случае метрологическая надежность СИ ниже требуемой $P_{ми}(T) < P_{ми}^*$ ($0,855 < 0,95$), выбираем значение $T_{новое} < T$, ближайшее к T снизу – 1,75 г. Далее процесс повторяется до тех пор пока , $P_{ми}(T) \approx P_{ми}^*$. Результаты расчета приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Расчет МПИ измерителей скорости «Визир»

МПИ T , г	$P_{ми}(T)$ веерная модель	$P_{ми}(T)$ линейная модель	$\min\{P_{ми}(T) \text{ веерная}, P_{ми}(T) \text{ линейная}\}$
2	0,915	0,855	0,855
1,75	0,926	0,85	0,85
1,5	0,936	0,896	0,896
1,25	0,947	0,91	0,91
1	0,957	0,934	0,934

Продолжение таблицы 3.14

МПИ T , г	$P_{ми}(T)$ всерная модель	$P_{ми}(T)$ линейная модель	$\min\{P_{ми}(T) \text{ всерная}, P_{ми}(T) \text{ линейная}\}$
0,75	0,968	0,952	0,952

Результаты обработки статистических данных показывают, что оптимальным по критерию $P_{ми}^*=0,95$ является МПИ $T=0,75$ года (9 месяцев). Уменьшение межповерочного интервала приведет к большим финансовым затратам на проведение проверок, а также к издержкам логистики, связанным с изъятием СИ с мест их непосредственной эксплуатации. Более частые проверки позволят уменьшить количество приборов, у которых погрешность выходит за пределы, установленные документацией. Автовладельцы будут уверены в точности фиксации скорости, что позволит уменьшить количество споров и конфликтов, связанные с фиксацией скорости транспортных средств. Корректировка межповерочного интервала повысит качество управления дорожного движения, снижение аварийности и травматизма на дорогах.

Заключение

В выпускной квалификационной работе проведен обзор методов измерения скорости транспортных средств, методов определения метрологической надежности средств измерений. Выявлены критерии назначения межповерочных (межкалибровочных) интервалов.

Произведен анализ полноты статистических данных по метрологической надежности. Анализ формы сбора данных на предприятии произведен на основе экспериментального метода, который позволил оценить все показатели надежности парка приборов. Анализ показал, что форма сбора данных в корректировке не нуждается. Получены рекомендации по изменению межповерочного (межкалибровочного) интервала на основе метода корректировки МПИ группы СИ, для случая, когда регистрируют только альтернативный признак годности. Выявлено, что необходимо уменьшить межповерочный интервала с 2-х лет (по паспорту), до 9 месяцев (на основании расчетных данных). Уменьшение межповерочного интервала приведет к увеличению финансовых затрат на проведение проверок, а также к увеличению издержек логистики, связанных с изъятием СИ с мест их непосредственной эксплуатации. С другой стороны, более частые проверки позволят уменьшить количество приборов, у которых погрешность выходит за пределы, установленные в описании типа. Автовладельцы будут уверены в точности фиксации скорости, что позволит уменьшить количество споров и конфликтов. Корректировка межповерочного интервала повысит качество управления дорожного движения, снижение аварийности и травматизма на дорогах.

Корректировка межповерочного интервала повысит качество управления дорожного движения, снизит аварийность и травматизм на дорогах.

Список публикаций

1 Ломакина А.А., Разработка программного обеспечения интеллектуального ультразвукового датчика уровня жидкости//Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. Т.1/ Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 325–326.

2 Ломакина А.А., Исследование метрологической надежности измерителей скорости «Визир»// Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. Т.1/ Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 270–272.

3 Ломакина А.А., Исследование изменений межповерочного интервала измерителей скорости «Визир» на основе статистических наблюдений//Информационно-измерительная техника и технологии, 2016.

Список использованных источников

- 1 ГОСАВТОИНСПЕКЦИЯ [Электронный ресурс].- Режим доступа:<http://www.stat.gibdd.ru>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 05.04.2016)
- 2 Описание типа: Измеритель скорости радиолокационный видеозаписывающий «Визир». – СПб, 2006. – 4 с.
- 3 Руденко Д.Ф., Волковец А.И., Гусинский А.В., Кострикин А.М. // Материалы IX МНТК «Современные средства связи» Мн. № 2(18)/2, 2004. Нарочь 27 сент.–1 окт. 2004 г. С. 146–147.
- 4 Г.Б. Белоцерковский. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М., Издательский центр «Сов.радио»-1975
- 5 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. — Издание 7-е, исправленное. — М., Издательство Наука, 1988. — С. 158-159. — («Теоретическая физика», том II).
- 6 Методика поверки: Измеритель скорости радиолокационный видеозаписывающий «Визир». – СПб, 2006. – 5 с.
- 7 Описание типа: Стенд автоматизированный для испытаний и поверки радиолокационных измерителей скорости «Сапсан 2». – СПб, 2007. – 4 с.
- 8 А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. Метрология.- М., Издательство «Логос».- 2001 г.
- 9 В.К.Жуков. Теория погрешностей технических измерений. Томский политехнический университет. – Томск: Издательство ТПУ. – 2009. – 179 с.
- 10 Фридман А.Э. Основы метрологии. Современный курс.- СПб., НПО «Профессионал». – 2008
- 11 В.Ю.Конотопский. Методические указания к выполнению раздела «Финансовый менеджмент, Ресурсоэффективность и ресурсосбережение» магистерских диссертаций для всех специальностей ИК.Томский политехнический университет. – Томск: Издательство ТПУ. – 2015. – 29 с.

12 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы. М: Минздрав России, 2003.

13 СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997.

14 Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 N 7-ФЗ. [Электронный ресурс]: Единая справочная служба Консорциума «Кодекс». – Режим доступа: <http://ezproxy.ha.tpu.ru:2065/docs/>, публичное пользование ограничено. – Загл. с экрана. (дата обращения: 20.05.2014)

15 СанПиН 2.2.2.542-96 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы. М: Госкомсанэпиднадзор России, 1996.

16 СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов.

Приложение А
(Обязательное)

Раздел 1

Измеритель скорости радиолокационный «Визир»

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ41	Ломакина Анастасия Александровна		

Консультант кафедры КИСМ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. – КИСМ	Казаков Вениамин Юрьевич	К.ф.м.н		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шепетовский Денис Владимирович			

Speed measuring radar «Vizir»

1.1 Speed measurement methods

1.1.1 Frequency method

The frequency method of measurement of distance over the period measures frequency that changes linearly. The method is implemented by using a frequency modulation of the continuously emitted signal.

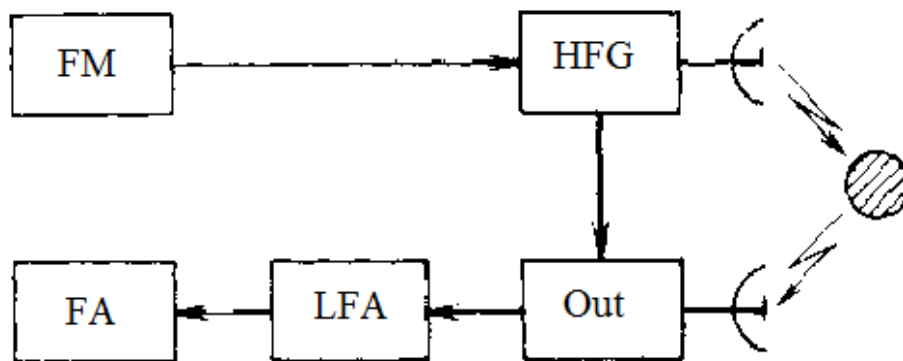


Figure 1.1 – Block diagram of the frequency method

In this method a continuous frequency-modulated oscillation is emitted. The delay time is determined by measuring the beat frequency between the emitted and received signals.

The transmitter, presented in Figure 1.1 consists of a frequency modulator FM and high-frequency generator HFG. It oscillates, then the frequency varies according to the periodic sawtooth or harmonic law as shown in Figure 1.2.

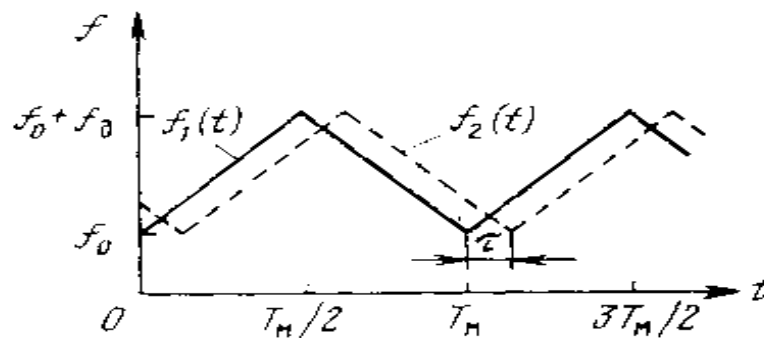


Figure 1.2 – Change in the frequency of the emitted received signal of the frequency range finder

With a symmetrical sawtooth modulation the frequency emitted by the fluctuations in the range $0 \leq t \leq T_M/2$ is defined by the formula (1.1):

$$f_1(t) = f_0 + \frac{2f_{\Delta}t}{T_M}, \quad (1.1)$$

where f_0 – the initial frequency value, Hz;

f_{Δ} – frequency deviation, Hz;

$T_M = 1/F_M$ - modulation period, c.

The frequency of the received signal $f_2(t)$ varies in sawtooth manner, when the object is stationary it is determined according to the formula (1.2):

$$f_2(t) = f_0 + \frac{2f_{\Delta}(t-\tau)}{T_M}, \quad (1.2)$$

When the signal is delayed for time τ , which is defined by the formula (1.3):

$$\tau = 2R/c, \quad (1.3)$$

Beats of difference frequency are formed at the mixer's output marked Out according to the formula (1.4):

$$f_6 = f_1(t) - f_2(t) = \frac{4f_{\Delta}F_MR}{c}, \quad (1.4)$$

After low frequency amplifier LFA the beats of the difference frequency go into the frequency analyzer FA.

The speed of a moving object, knowing the distance and time, by the formula (1.5):

$$U = R/\tau, \quad (1.5)$$

where R – distance to the object, m;

τ – delay time with, s.

The advantages and disadvantages of the frequency method are presented in Table 1.1.

Table 1.1 - Advantages and disadvantages of the frequency method

Advantages	Disadvantages
measurement of small distances, the possibility of resolving objects by range	two antennas are necessary
the use of low-power transmitter	receiver sensitivity deterioration due to leakage through the antenna into the receiving channel of the emission of the transmitter subjected to random variations
a small peak power of the probe signal	High linearity requirements for frequency measurement

1.1.2 Phase method

The phase (coherent) radiolocation method is based on the isolation and analysis of the difference between the emitted and the reflected signals [3], the Doppler effect arises as a consequence, when the signal is reflected by a moving object. The transmitting device may operate continuously or in pulsed mode. One of the main advantages of this method is that it enables to see only moving objects, eliminating the interference arising from fixed objects, which are located between the receiving apparatus and the target, or behind the target [3]. Large-scale generator LSG shown in Figure 1.3 allows modulating the amplitude of fluctuations of the high-frequency generator HFG that are emitted into space.

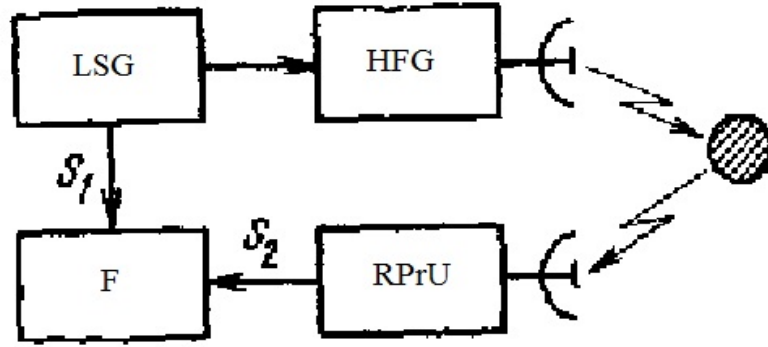


Figure 1.3 – Block diagram of the phase method

The phase meter PH receives the probing signal from LSG, which is defined by the formula (1.6):

$$S_1 = A_1 \cdot \sin(\omega_M \cdot t + \varphi_0), \quad (1.6)$$

The probing signal, which is a continuous harmonic oscillation, and a receiver output signal, excluding noise can be determined by formula (1.7) as follows:

$$S_2 = A_2 \cdot \sin[\omega_M \cdot (t - \tau) + \varphi_0 + \varphi_{OT} + \varphi_D], \quad (1.7)$$

where ω_M – the frequency scale, Hz;

φ_0 – the initial phase, rad;

τ – time of the signal delay, c;

φ_{OT} – phase shift caused by the reflection of radio waves from the object, rad;

φ_D – phase shift of the signal in the rangefinder circuits, rad.

Phase difference of signals S_1 and S_2 is determined by the formula (1.8):

$$\varphi_p = \omega_M \cdot \tau - \varphi_{OT} - \varphi_D, \quad (1.8)$$

Therefore, the delay time will be determined according to the formula (1.9):

$$\tau = (\varphi_p + \varphi_{OT} + \varphi_D) / \omega_M, \quad (1.9)$$

And, therefore, the range to the object is determined by the formula (1.10):

$$R = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c \cdot (\varphi_p + \varphi_{OT} + \varphi_D)}{2 \cdot \omega_M}. \quad (1.10)$$

After finding out the phase shift φ_{om} and φ_o , the phase difference can be measured and the range can be found. Expression (1.9) is valid also when dealing

with the respondent. In that case φ_{om} should be understood as a signal phase shift in the circuits of the responder.

The phase shift φ_o can be eliminated at the RD calibration when part of the signal from URCH output (not shown, is a part of HFG, which is shown in Figure 1.3) is transmitted to the RPrU receiver input and the phase meter measures $\varphi_p = \varphi_d$. Phase change when signal φ_{or} is reflected greatly affects the accuracy, since the reflection from the metal and dielectric φ_{or} changes by 180 degrees. Therefore, the work is done in the signal modulation mode.

The speed of a moving object, knowing the distance and time, by the formula (1.11):

$$U = R/\tau, \quad (1.11)$$

where R – distance to the object, m;

τ – delay time with, s.

The advantages and disadvantages of the phase method are presented in Table 1.2.

Table 1.2 – Advantages and disadvantages of the phase method

Advantages	Disadvantages
Small peak power of the generated oscillations due to the continuity of emission	(Missing radius resolution)
accuracy does not depend on the Doppler shift of the reflection frequency	receiver sensitivity deterioration due to the penetration of the transmitter emission, subject to random changes, through the antenna to the receiving channel
Simplicity	
measurement of small distances	using two antennas

1.1.3 Impulse method

Impulse radius measurement method is based on determining the delay time of the characteristic amplitude change of the received radar signal. The radar antenna (radar station) sends a powerful radio pulse that is reflected from the target, and accepted by it. The propagation velocity of the microwave signal, in whose form the radio pulse spreads, is much greater than the target speed, thus with good magnification the goal can be considered fixed. Then the time over which the radio signal reaches the goal - t_{direct} equals the time during which the reflected signal reaches the radar antenna - t_{refl} ($t_{\text{direct}} = t_{\text{refl}} = t$).

The signal emitted by the radar antenna will return to it in the form of a reflection over time by the formula (1.12):

$$t_D = t_{\text{direct}} + t_{\text{refl}} = 2t, \quad (1.12)$$

UHF (Ultra High Frequency) signals travel at a constant speed, so $D = c \cdot t$. Given that the propagation velocity of the microwave signal through the air is approximately equal to its propagation velocity in vacuum - c . Taking into account the previous expression, one can elicit the equation that determines the distance D , depending on the delay time t_D , defining the range D by the formula (1.13):

$$D = \frac{c \cdot t_D}{2}, \quad (1.13)$$

In order to continuously determine the distance, the radar must emit a periodic sequence of impulses, work in impulse mode. The block diagram is shown in Figure 1.4.

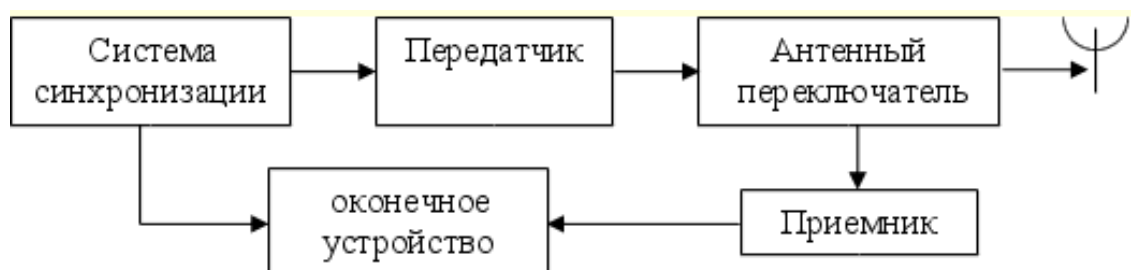


Figure 1.4 –Block diagram of the impulse method

Synchronization system determines the impulse radar operation. It forms video impulses at regular time intervals time T_i . T_i is the impulse repetition period. Synchronization system determines the period of operation a cycle of distance determination [4].

The transmitter is activated after receiving the next impulse from the synchronization system and over the time interval τ_u forms a signal of required power, amplitude, and frequency. τ_u is called pulse duration.

Over time the pulse width duplexer directs the signal emitted by the antenna. Then the receiver switches. The system is waiting for the end of the period of the reflected signal. Antenna switching spends a certain time [4].

The receiver selects the envelope of the received signal and transmits to the terminal device.

Over time of the impulse duration antenna switch directs the emitted signal at the antenna. Then it switches to a receiver. The system waits for the end of the reflected signal period. Antenna spends a certain time on the switching.

The receiver selects the envelope curve of the received signal and transmits to the terminal unit.

The terminal unit is typically implemented as a CRT (cathode ray tube), on whose screen the distance between two adjacent uneven peaks corresponds to the distance to the target. In the case the terminal unit is completed on CRT, synchronization system monitorings the work of the sawtooth voltage generator that goes into horizontal deflector plate, while the signal from the receiver is fed to the vertical deflector plate.

The speed of a moving object, knowing the distance and time, by the formula (1.14):

$$U = R/\tau , \quad (1.14)$$

where R – distance to the object, m;

τ – delay time with, s.

Advantages and disadvantages of this method are presented in Table 1.3 [4].

Table 1.3 – Advantages and disadvantages of impulse method

Advantages	Disadvantages
RLS with a single antenna, which allows to interchange the transmitting and receiving channels	the use of large impulse capacity of the transmitter
simple indicator device	Measurement of small distances is impossible
Measurement of multiple objects in range	a large range of the dead zone
the simplicity of the emitted pulses that last shortly, and that of the received signals	

1.2 Doppler Effect

The operating principle of the speed radar (SR) "Vizir" is based on the measurement of the frequency difference between the signal emitted by the SR and the signal reflected from the vehicle located in the monitoring zone (the Doppler effect).

The Doppler Effect is observed when the source and the receiver of electromagnetic waves are in motion with respect to each other, in this case a change in wave frequency occurs, which is registered by the receiver. The Doppler Effect for electromagnetic waves is based on the special relativity theory.

The relation that describes the Doppler Effect for electromagnetic waves in vacuum, in view of Lorentz transformation laws, is determined by the formula (1.15):

$$v = \frac{v_0 \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}}}{1 + \left(\frac{U}{c}\right) \cos \theta}, \quad (1.15)$$

where c – light speed, m/c;

U – velocity of the source relative to the receiver (observer), m/c;

θ – the angle between the direction of the source and the velocity vector in the receiver reference system, rad;

v_0 – radiating electromagnetic wave frequency, Hz;

v – reflected electromagnetic wave frequency, Hz.

The relativistic Doppler formula coincides with the classical formula, the longitudinal Doppler effect is observed if the movement of the wave source relative to the receiver is performed at low speed when the motion of the source relative to the receiver along a straight line connecting them [5].

When the source and the receiver converge ($\theta = \pi$), the amount of blueshift is defined by the formula (1.16):

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{U}{c}}{1 - \frac{U}{c}}} > v_0, \quad (1.16)$$

In case of the mutual removal of the source and destination ($\theta = 0$), the amount of blueshift is determined by the formula (1.17):

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{U}{c}}{1 + \frac{U}{c}}} < v_0, \quad (1.17)$$

The relativistic theory of the Doppler Effect determines the existence of the transverse Doppler effect, which is observed under the conditions $\theta = \frac{\pi}{2}$ and $\theta = \frac{3\pi}{2}$, when the source is moving perpendicular to the line of sight (in a circle with the receiver in its center), the amount of blueshift is determined by the formula (1.18):

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}} < v_0, \quad (1.18)$$

The transverse Doppler Effect is a purely relativistic effect, so it is inexplicable in classical physics.

Based on the formula (1.15) it can be concluded that the transverse Doppler effect is proportional to the relation $\frac{U^2}{c^2}$, therefore, it is significantly weaker than the longitudinal, which is proportional to $\frac{U}{c}$.

When the vector is decomposed into components in relation to velocity, one provides a longitudinal effect, the other - the transverse effect.

The transverse Doppler Effect is due to the slowing of time in moving frames.

American physicists G. Ives and Stilwell checked the correctness of the relativistic formula (1.15) and verified experimentally the existence of the Doppler Effect in the 1930s. The American physicists studied the emission of hydrogen atoms, which accelerate to $2 \cdot 10^6$ m/s with a spectrograph. In 1938 their results were published. The transverse Doppler Effect was observed in full compliance with the relativistic frequency transformations (spectrum of atom emission proved to be shifted to lower frequencies), which contributed to the slowing of time in moving inertial reference systems [5].

The Doppler Effect is widely used in science and technology. This phenomenon plays an important role in astrophysics. The Doppler shift of the absorption lines in the spectra of stars and nebulae allowed to determine radial velocities $U' \cos \theta$ of objects in relation to the Earth, when $U \ll c$ according to the formula (1.19):

$$U' \cos \theta \approx \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) c, \quad (1.19)$$

1.3 Specifications speed measuring «Vizir»

Speed measuring radar video recorder «Vizir» (hereinafter referred as SR), is designed for measuring the movement speed of vehicles, recording the fact of traffic rules violation, the visual display on the screen, processing, storage and video playback. Speed radar is intended for monitoring vehicle speed limits. The appearance of "Vizir" speed radar is shown in Figure 1.5 [2].



Figure 1.5 – "Vizir" speed radar

Speed radar consists of two main components: a radio signal emitter and signal receiver. By pointing the device to a moving target, and turning it on, it will start sending radio waves in the direction of the target, and then pick up the reflected waves. SR detects the frequency change in the reflected signal, and based on this change it calculates the target speed. Let us consider the basic specifications.

SR maintains its settings when operating in the following environments:

- ambient temperature of 0 to 60 ° C;
- relative humidity 98% at 25 ° C;
- atmospheric pressure of 84 to 106,7 kPa (of 630 to 800 mm Hg)

Main specifications:

- speed radar has a maximum range of speed measurement not less than 400 m;

- SR provides a selectivity of vehicles by their movement speed with the speed difference not less than 3 km/h and the ratio of their effective reflective area of not less than 1:10;
- SR measures the speed in the range from 20 to 250 km/h;
- the SR allows to reduce the operating range discretely;
- provides the selectivity of vehicles;
- limits of permissible absolute error of speed measurement in stationery mode are no more than ± 1 km/h;
- limits of permissible absolute error of speed measurement in patrol mode are no more than ± 2 km/h.
- The duration of video can be set from 5 to 60 seconds with a step of 5 seconds;
- Varying video speed can be set: 3, 6 or 12 frames per second;
- SR current consumption during normal supply voltage is less than 1 A;
- limit values of the external supply voltage from 9 to 16 V;
- SR operating emission frequency $(24,15 \pm 0,10)$ GHz;
- SR weight with battery pack is no more than 1,5 kg;
- average SR service time (before decommissioning) is 6 years.

SR is a measurement tool and, in accordance with applicable law, is subject to calibration testing by the State. Calibration testing is performed by authorized territorial bodies of the State Standard of the Russian Federation according to the approved methodology. Calibration interval is 2 years.

Below the standardized specifications of speed radars will be considered.

1.4 The standardized specifications of speed radars

Standard GOST R 50856 establishes the following specifications normalized speed measuring devices.

Working emission frequency is set in accordance with the State Commission on Radio Frequencies of the Ministry of Communications of the Russian Federation.

Frequency fluctuation of emitted signals under constant ambient conditions and a constant voltage power supply for any 15-minute period after the establishment of the working mode when the speed radar operates under normal conditions is $\pm 1 \cdot 10^{-3}$.

The lower and upper boundaries for the speed measurement range are selected from the range from 10 to 100 km / h. If necessary, the speed measurement range may be divided into sub-ranges.

The basic error of measurement of the driving speed of vehicles in the entire range of measured speeds, operating temperature range and supply voltage should not exceed $\pm (1 \text{ km / h} + 1 \text{ measurement unit})$.

The lower and upper boundaries of the speed radar radius are selected from the range from 10 to 500 m.

The measurement error of the (emission) transmitter power should not exceed $\pm 10 \%$.

Selection value of vehicles in the direction of their movement (weakening of the signal reflected from the vehicles moving in the opposite direction), the selection determination error should not exceed $\pm 3 \text{ dB}$.

The time of a single measurement of the driving speed of vehicles at maximum distance is not more than 1 ms.

The scale of the speed radar is set in the terms of reference and specifications and is selected from the set of values 1; 2; 5; 10 km / h.

Speed radars must ensure the selection of vehicles by their driving speed with the speed difference not more than 10 km / h.

Time of setting the operating mode is selected from the set of values: 1; 5; 15; 30 min. Duration of speed radar continuous operation is selected from the set of values: 8; 16; 24 h.

Speed radar has manual, automatic and complex monitoring options.

Manual monitoring requires a number of actions to be performed: setting of modes and parameters of the speed radar, their exterior check without the use of aids and devices not included in the speed radar package.

Automatic monitoring requires the speed radar program to be set and executed without an operator and with or without the use of aids and devices not included in the speed radar package.

Automatic monitoring requires that the interface functions for the operation of speed radars in the public channel comply with the requirements of GOST 26.003. For complex monitoring the requirements for both manual and automatic monitoring must be met.

To monitor performance and conduct verification examine ways and means of checking the radar gauges "Vizir" speed.

1.5 Methods and means of verification of meter speed "Vizir"

During the primary, periodic calibration testing after repairs the following operations, must be carried out [6].

- determination of emission frequency;
- determination of operating radius in static conditions;
- determination of measured speed range in static conditions;
- determination of speed measurement error in static conditions;
- determination of operating radius in patrol conditions;
- determination of measured speed range in patrol conditions;
- determination of speed measurement error in patrol conditions.

During calibration automated bench for testing and calibration of speed measuring radars "Sapsan 2" should be used, with the following specifications [7]:

- operating frequency range from 24,050 to 24,250 GHz;
- frequency measurement error ± 2 MHz;
- simulated speeds range from 20 to 400 km / h;
- simulation speed error $\pm 0,1$ km / h.

Automated bench "Sapsan 2" is designed for calibration, testing and monitoring of metrological characteristics of speed measuring radars for vehicles with an operating frequency of 10 GHz and 24 GHz.

The bench has manual, semi-automatic and automatic modes. Its appearance is shown in Figure 1.6.



Figure 1.6 – Appearance of the stand

The bench requires a personal computer with specialized software for operating. Testing takes place in accordance with approved methods and calibration takes less than 30 seconds.

Accessory modulators ensure operation of the bench in 3 cm and 2 cm frequency ranges. Depending on the supply package the bench incorporates accessory modulators for the reflected signal for 10 and 24 GHz.

The bench operating principle is based on the monitoring of the variable reactive load value in the path of the reflected signal modulator, through which electromagnetic waves emitted by the SR are propagated. The modulation frequency of the reactive load value meets the required simulated driving speeds. Modulation band corresponds to the direction of movement, and the modulation amplitude corresponds to the distance to the simulated driving vehicle.

The bench consists of universal reflected signal modulators, processor monitoring means, an acoustic chamber, lodgements and support, and connecting cables.

The bench allows the SR calibration testing to be performed both in laboratory conditions and directly at the sites in the locations of SR fixed installation.

To calibrate the SR in the laboratory the SR is installed in an acoustic chamber using lodgement; the acoustic chamber is mounted on the reflected signal modulator of the corresponding frequency range. Processor monitoring unit and a personal computer, monitoring the bench operation mode, are connected to the reflected signal modulator. To check SR stationary installed at the site a hinged support attached directly to the SR is used. Reflected signal modulator of the corresponding frequency range is mounted to the hinged support; it is connected to the processing unit and a personal computer, monitoring the bench operation mode.

Working conditions:

- ambient air temperature from -10 to + 40 ° C;
- relative humidity at 30° C, 90%;
- atmospheric pressure from 630 to 800 mm Hg.

It is allowed to use other means of checking with characteristics not worse than the ones listed above. All calibration means should be serviceable, checked and have a calibration certificate.

While preparing for calibration and its conduct it is necessary to observe the safety regulations and industrial hygiene in the electronics industry, the safety regulations for electrical installations and the requirements set out in the technical documentation for standard and accessory calibration instruments.

Calibration testing involves work with direct microwave radiation, which requires that precautions be taken to avoid exposure of the operator to the microwave radiation.

During calibration it is prohibited to remain in front of the SR along the emission axis at a distance of less than 1 meter for longer than 30 minutes.

Connecting all circuitry during calibration is to be done only in de-energized mode.

Exterior check

During the exterior check accordance of SR to the following requirements must be established:

- SR equipment comply with the passport;
- SR case should contain the following information: product name, name or trademark of the manufacturer, year and serial number of the product, pattern approval mark;
- cable sheath surface must not be damaged;
- SR must have no mechanical failures, affecting its performance;
- metal parts of the SR should be free of corrosion.

The calibration results of the item are considered positive, if the abovementioned points are fulfilled.

Sealing

Set the SR into the bench and disable simulation of the vehicle driving mode in the bench.

Switch on the SR in accordance with the operations manual.

Remove the SR from the bench and make sure the video of the surroundings is present on the SR display.

SR sealing considered complete if the video of the surroundings is present on the SR display.

Determination of metrological parameters

Determination of the SR emission frequency. Disable the vehicle movement simulation following the operations manual instructions for the automated bench for testing and calibration of speed measuring radar "Sapsan 2". Following the operations manual, put SR in continuous emission. Measure the SR emission frequency.

The calibration results of the item are considered positive if the measured emission frequency is in the range $(24,15 \pm 0,10)$ GHz.

Determination of operating radius, the range of measured speed and the speed measurement error in the static conditions. Set the following parameters for the SR in accordance with the operations manual:

- Operating radius - maximum;
- SR working conditions - static;
- Movement direction of the measured object - counter (approximation).

Set on the stand values simulated speeds of table 1.4, calibration results are considered positive if the measured speed values correspond to those indicated in Table 1.4 with inaccuracy of no more than ± 1 km / h [6].

Table 1.4 – Simulated speed values under static conditions

Operating parameters in static conditions	Simulated speed values		
Set speed of the first vehicle, km / h	30	90	210
Set speed of the second vehicle, km / h	20	80	200
Distance to the first vehicle, m	300	300	300
Distance to the second vehicle, m	150	150	150
Measured vehicle speed in km / h	30	90	210

Determination of operating radius, the range of measured speed and the speed measurement error in patrol conditions. Set the following parameters for the SR in accordance with the operations manual:

- operating radius - maximum;
- SR working conditions - patrol;
- movement direction of the measured object - counter (approximation).

Set on the stand values simulated speeds of table 1.5. Calibration results are considered positive if the measured speed values correspond to those indicated in Table 1.5 with inaccuracy of no more than ± 2 km / h [6].

Table 1.5 – Simulated speed values under patrol conditions

Operating parameters in patrol conditions	Simulated speed values	
Set speed of the first vehicle, km / h	60	80
Set speed of the second vehicle, km / h	150	210
Distance to the first vehicle, m	100	100
Distance to the second vehicle, m	300	300
Measured patrol vehicle speed, km / h	60	80
Measured vehicle speed km / h	90	130

Below the metrological reliability of measuring devices will be considered.